

**Proposta de Catálogo de Pavimentos com Resíduos de  
Construção e Demolição para Estradas de Baixo  
Tráfego**

**Ana Rita Monteiro Rocha Martins**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientadores: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves  
Doutora Ana Cristina Ferreira de Oliveira Rosado Freire

**Júri**

Presidente: Professor Doutor João Torres de Quinhones Levy  
Orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves  
Vogal: Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

**Setembro 2015**



## Agradecimentos

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, o tempo que dedicaram a ajudar-me, a paciência em todas as minhas decisões e o esforço que fizeram para poder chegar aqui.

Agradeço ao meu namorado a ajuda nos momentos mais críticos e por estar sempre presente quando precisei dele.

Agradeço aos meus amigos a companhia constante no caminho percorrido, tudo o que aprendi com eles, nomeadamente as aulas de pavimentos no autocarro depois dos jogos.

Agradeço aos meus orientadores a dedicação, a presença constante para ajudar a traçar o caminho e o empenho nos momentos mais críticos.



## Resumo

A reciclagem permite transformar resíduos, aos quais muitas vezes não se associa valor, em recursos e acarreta vantagens ambientais, económicas e sociais. A utilização de alguns destes resíduos é viável na construção e reabilitação de pavimentos rodoviários, nomeadamente, resíduos de construção e demolição (RCD).

A presente dissertação integra-se numa das tarefas do projeto de investigação SUPREMA, relativa à análise do comportamento dos trechos experimentais onde foram aplicados RCD. Propõe-se a utilizar agregados, caracterizados no âmbito do projeto SUPREMA, em camadas não ligadas de pavimento.

O campo de aplicação dos materiais nas estruturas de pavimentos foi definido com base nas especificações LNEC, guia para a utilização de RCD em vias municipais e rurais e em valas e guia espanhol. As estruturas foram analisadas para condições impostas de fundação e tráfego, para um período de 10 anos, com base no método da Shell e metodologia empírico-mecanicista (MEPDG).

O MEPDG utiliza a aplicação AASHTOWare<sup>®</sup> pavement design (DARWin-ME) que, com base em dados dos materiais, tráfego e condições climáticas, prevê o comportamento do pavimento ao longo dos anos. Avaliou-se a evolução do desempenho das estruturas de pavimento para irregularidade (IRI), deformação total e pele de crocodilo.

Este trabalho apresenta diferentes catálogos com soluções de utilização de RCD em camadas de base e sub-base. Estes catálogos pretendem apoiar o projetista mas a sua consulta não invalida a necessidade de confirmar a viabilidade da estrutura em obra, através do respetivo dimensionamento pelo método considerado mais adequado.

*Palavras-chave: estrada, pavimentos, catálogo, dimensionamento, RCD, MEPDG.*



## Abstract

Recycling turns residues, often considered worthless, into resources, with environmental, economical and social advantages. The use of construction and demolition waste (CDW) in road pavement construction and rehabilitation is one such example.

This dissertation lies in the context of the SUPREMA project, namely the analysis of the behavior of pavement structures where CDW were used. In particular, the use of some of these aggregates in unbound layers of pavements is proposed.

The field of application of these materials in pavement structures was determined with the LNEC Specifications, the Guide for the use of Construction and Demolition Waste in Municipal and Rural Roads and Trenches, and the Spanish Guide, as frameworks. The structures were analysed for a certain design and traffic conditions, for a design period of 10 years, under Shell's and the mechanistic-empirical (MEPDG) approaches.

The MEPDG uses AASHTOWare<sup>®</sup> pavement design software (DARWin-ME) which, based on material, traffic and climate properties, predicts the pavement behavior over time. This time evolution was studied in terms of roughness (IRI), total deformation and fatigue cracking.

This dissertation compiles the viable solutions for CDW usage in base and sub-base layers into different catalogs, aiming to aid the designer in early conception stages, but without dismissing the need for actual in-situ validation of the chosen structure, via the design method most suitable to the project.

*Keywords: road, pavements, catalogue, design, CDW, MEPDG.*





# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Índice .....	vii
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Quadros .....	xi
Siglas e Acrónimos.....	xv
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento e motivação .....	1
1.2 Objetivo geral .....	2
1.3 Metodologia .....	2
1.4 Estrutura .....	3
2 Reciclagem de materiais.....	5
2.1 Utilização de agregados reciclados.....	5
2.2 Utilização de Resíduos de Construção e Demolição .....	6
2.2.1 Gestão e legislação de resíduos .....	6
2.2.2 Enquadramento nacional .....	7
2.2.3 Enquadramento internacional .....	11
2.3 Projeto SUPREMA .....	20
3 Dimensionamento de pavimentos segundo a AASHTO .....	25
3.1 Manual de dimensionamento (MEPDG) .....	25
3.2 Aplicação AASHTOWare® pavement design (DARWin-ME) .....	26
3.2.1 Estrutura .....	26
3.2.2 Materiais .....	27
3.2.3 Tráfego .....	28
3.2.4 Condições climáticas.....	34
3.2.5 Degradações do pavimento .....	37
3.2.6 Critérios de desempenho .....	45

3.3	Implementação local do MEPDG .....	48
4	Proposta de estruturas-tipo de pavimentos com RCD em camadas não ligadas .....	53
4.1	Materiais .....	53
4.2	Fundação.....	54
4.3	Tráfego .....	56
4.4	Condições climáticas.....	58
4.5	Conceção e dimensionamento das estruturas de pavimento .....	58
4.6	Resultados utilização da aplicação DARWin-ME.....	67
4.7	Catálogo de estruturas de pavimento com RCD.....	68
5	Conclusão .....	75
5.1	Síntese do trabalho .....	75
5.2	Principais conclusões .....	76
5.3	Desenvolvimentos futuros .....	77
6	Referências bibliográficas .....	79
	Anexos.....	85
	Anexo I. Aplicação DARWin-ME: Materiais.....	87
	Anexo II. Aplicação DARWin-ME: Tráfego .....	91
	Anexo III. Aplicação DARWin-ME: Condições Climáticas.....	95
	Anexo IV. Classificação dos agregados reciclados .....	97
	Anexo V. Dados de cálculo: método da Shell.....	101
	Anexo VI. Dados dos materiais: MEPDG .....	103
	Anexo VII. Dados de tráfego: MEPDG.....	105
	Anexo VIII. Ficha resumo: método da Shell.....	107
	Anexo IX. Ficha resumo: MEPDG.....	109

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Esquema das secções experimentais da estrada rural não pavimentada (Jiménez, et al., 2012).....	18
Figura 2.2 – Fotografia dos materiais utilizados no projeto SUPREMA (Freire, et al., 2012). ...	21
Figura 2.3 – Planta esquemática dos trechos experimentais (Simões, 2013).....	23
Figura 3.1 – Conjunto de dados de <i>input</i> e <i>output</i> do MEPDG.....	26
Figura 3.2 – <i>Printscreen</i> da janela de introdução das características dos materiais. ....	27
Figura 3.3 – <i>Printscreen</i> da janela de introdução dos dados de tráfego. ....	28
Figura 3.4 – <i>Printscreen</i> da janela de introdução dos dados de clima. ....	35
Figura 3.5 – Quintis da temperatura, utilizados para determinar algumas propriedades dos materiais. ....	36
Figura 3.6 – Conceito de grau de confiança do projeto para o cálculo da irregularidade (IRI) (AASHTO, 2008). ....	46
Figura 3.7 – Distribuição de probabilidade para desvios ( $\delta_0$ ) de desempenho de projeto (AASHTO, 1993). ....	47
Figura 3.8 – Estados analisados, abaixo da linha azul ( <a href="http://www.paises-america.com/">http://www.paises-america.com/</a> ). ....	50
Figura 4.1– Condições de fundação, tráfego, clima e vida útil do pavimento. ....	59
Figura 4.2 – Relatório DARWin-ME: dados de resumo de <i>input</i> . ....	65
Figura 4.3 – Relatório DARWin-ME: dados de resumo de <i>output</i> . ....	66
Figura 4.4 – Fluxograma de decisão para consulta dos catálogos.....	69



## Lista de Quadros

Quadro 2.1 – Classificação dos agregados, segundo a especificação LNEC E 473. ....	8
Quadro 2.2 – Propriedades e requisitos mínimos dos agregados reciclados para aplicação em camadas não ligadas de pavimentos (especificação LNEC E 473). ....	9
Quadro 2.3 – Campo de aplicação dos agregados reciclados em camadas não-ligadas de pavimentos, segundo a especificação LNEC E 473. ....	9
Quadro 2.4 – Classificação dos agregados, segundo a especificação LNEC E 474. ....	10
Quadro 2.5 – Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos materiais reciclados para aplicação em aterro e camada de leito (especificação LNEC E 474). ....	10
Quadro 2.6 – Campo de aplicação dos materiais MAT1 e MAT2 em aterro e leito do pavimento, segundo a especificação LNEC E 474. ....	11
Quadro 2.7 – Requisitos de conformidade (Rodrigues, 2013). ....	12
Quadro 2.8 - Campo de aplicação dos agregados reciclados (Rodrigues, 2013). ....	12
Quadro 2.9 – Classe dos agregados reciclados provenientes de RCD (GERD, 2011). ....	15
Quadro 2.10 – Resumo dos requisitos técnicos (GERD, 2011). ....	16
Quadro 2.11 – Viabilidade de aplicação e categorias de uso para agregados reciclados (GERD, 2011). ....	16
Quadro 2.12 – Classes de tráfego, classificação para tráfego médio diário anual de veículos pesados (TM <sub>DA</sub> ) <sub>p</sub> , em veíc pesados/dia (MOPU, 2003). ....	17
Quadro 2.13 – Classes de fundação, Espanha (MOPU, 2003). ....	17
Quadro 2.14 - Constituição dos RCD do projeto: estrada rural não-pavimentada (Jiménez, et al., 2012) ....	18
Quadro 2.15 - Propriedades dos materiais: estrada rural não pavimentada (Jiménez, et al., 2012). ....	19
Quadro 2.16 – Agregados utilizados no projeto SUPREMA (Simões, 2013). ....	21
Quadro 2.17 - Constituição dos RCD estudados no projeto SUPREMA. ....	22
Quadro 2.18 - Propriedades dos materiais estudados no projeto SUPREMA. ....	22
Quadro 2.19 – Módulos de deformabilidade das camadas granulares e de fundação, da campanha 10 do projeto SUPREMA. ....	23
Quadro 3.1 – Comparação dos manuais AASHTO e MEPDG (UW, acedido em Outubro de 2014). ....	26
Quadro 3.2 – Correspondência entre classes e subclasses segundo os organismos rodoviários de Portugal e E.U.A. (Cordeiro, 2010). ....	29
Quadro 3.3 – Distribuição de carga nos eixos (ALF): aplicação DARWin-ME. Exemplo de eixo simples. ....	31

Quadro 3.4 – Número de tipo de eixos por veículos (NAT): aplicação DARWin-ME. ....	32
Quadro 3.5 – Volume de veículos (VCD): aplicação DARWin-ME. Exemplo para TTC 12 e 14. .....	32
Quadro 3.6 – Fatores de equivalência para eixo simples de 18-kip (adaptado de AASHTO, 1993). ....	33
Quadro 3.7 – Tipo de degradação considerada pela aplicação DARWin-ME para pavimentos flexíveis.....	37
Quadro 3.8 - Valores assumidos para critérios de projeto, considerando estradas secundárias. .....	46
Quadro 3.9 – Adaptação da calibração global, realizada por diferentes estados dos E.U.A.. ...	49
Quadro 3.10 – Resumo do clima de Portugal e de alguns estados dos E.U.A.. ....	50
Quadro 3.11 – Influência das cinco variáveis do clima em estudo no cálculo do desempenho do pavimento (Hall, et al., 2011). ....	51
Quadro 3.12 – <i>Ranking</i> dos estados mais semelhantes a Portugal em termos de clima. ....	51
Quadro 4.1 – Classificação do agregado reciclado em camadas não ligadas de pavimentos. .	53
Quadro 4.2 – Aplicação recomendada para os agregados reciclados em estudo. ....	54
Quadro 4.3 – Classes de terrenos de fundação (JAE, 1995). ....	54
Quadro 4.4 – Camadas de leito do pavimento dos solos em estudo. ....	55
Quadro 4.5 – Relação entre as classes de tráfego e cenários de distribuição utilizados.....	57
Quadro 4.6 – Valores de “temperatura de serviço”, PAVIFLEX (Baptista, 1999). ....	58
Quadro 4.7 – Estruturas de pavimentos utilizadas em Portugal e Espanha para pavimentos flexíveis (espessuras mínimas das camadas em centímetros). ....	60
Quadro 4.8 – Valores de extensões e deformação para o caso A (F2 e T7a). ....	64
Quadro 4.9 – Catálogo A: Estruturas com camadas granulares em BBM e ABGE e período de vida de 10 anos. ....	72
Quadro 4.10 – Catálogo B: Estruturas com camadas granulares em COMP e ABGE e período de vida de 10 anos. ....	73
Quadro 4.11 – Catálogo C: Estruturas com camadas granulares em BBM e ABGE e período de vida de 20 anos. ....	74
Quadro 4.12 - Catálogo D: Estruturas com camadas granulares por COMP e ABGE e período de vida de 20 anos. ....	74
Quadro I.1 – Dados de <i>input</i> da aplicação DARWin-Me relativos aos materiais de camadas betuminosas. ....	87
Quadro I.2 - Dados de <i>input</i> da aplicação DARWin-Me relativos aos materiais de camadas granulares e leito do pavimento. ....	89

Quadro II.1 - Dados de <i>input</i> da aplicação DARWin-Me relativos ao tráfego.....	91
Quadro III.1 - Dados de <i>input</i> da aplicação DARWin-Me relativos às condições climáticas. ....	95
Quadro IV.1 – Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 473. ....	97
Quadro IV.2 – Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 473.....	97
Quadro IV.3 - Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 474. ....	98
Quadro IV.4 - Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo a proposta de alteração às especificações LNEC.....	98
Quadro IV.5 - Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo o Guia GEAR (GERD, 2011). ....	99
Quadro IV.6 - Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo o Guia GEAR (GERD, 2011).....	100
Quadro V.1 – Propriedades das estruturas de pavimento: utilização da aplicação BISAR (para 10 anos).....	101
Quadro V.2 – Propriedades das estruturas de pavimento: utilização da aplicação BISAR (para 20 anos).....	102
Quadro VI.1 – Propriedades das camadas betuminosas e revestimento superficial utilizadas na aplicação DARWin-ME.....	103
Quadro VI.2 – Propriedades das camadas granulares utilizadas na aplicação DARWin-ME..	104
Quadro VII.1 – Caraterísticas do tráfego utilizadas na aplicação DARWin-ME. ....	105
Quadro VIII.1 – Resultados da aplicação do método da Shell (com recurso ao BISAR) para estruturas de pavimento presentes nos catálogos A e B (10 anos). ....	107
Quadro VIII.2 – Resultados da aplicação do método da Shell (com recurso ao BISAR) para estruturas de pavimento presentes nos catálogos C e D (20 anos). ....	108
Quadro IX.1 – Resultados da aplicação do MEPDG (com recurso ao DARWin-ME). ....	109





## Siglas e Acrónimos

AASHO	American Association of States Highways Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABGE	Agregado Britado de Granulometria Extensa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ALF	Axle Load Factor
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
BBM	Betão Britado Misto
BD	Betão betuminoso em camada de desgaste
CBR	California Bearing Ratio
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
COMP	Mistura composta por 70% de ABGE com 30% de MBF
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CoST	Construction Sector Transparency initiative
DCP	Dynamic Cone Penetration Teste
DFID	Department for International Development (Reino Unido)
DOT	Department of Transportation (E.U.A.)
DPI	DCP Penetration Index
EALF	Equivalent Axle Load Factor
EICM	Enhanced Integrated Climatic Model
EP	Estradas de Portugal
ESALs	Equivalent Single Axle Load
FEM	Finite Element Method
FHWA	Federal Highway Administration (E.U.A.)
GEAR	Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición
GEOS	Goddard Earth Observing System
GERD	Gestores de Resíduos de Construcción y Demolición
GTR	Guide des Terrassements Routiers
ICM	Integrated Climatic Model
IDRRIM	Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité

IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ITF	International Transport Forum
LCCA	Life Cycle Cost Analysis
LER	Lista Europeia de Resíduos
LTPP	Long-Term Pavement Performance
MAAT	Mean Annual Air Temperature
MACOPAV	Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional
MAF	Truck Monthly Adjustment Factor
MB	Macadame Betuminoso
MBB	Mistura Betuminosa Britada
MBF	Mistura Betuminosa Fresada
MCHW	Manual of Contract documents for Highway Works
MEEDDAT	Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MERRA	Modern Era-Retrospective Analysis
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAT	Number of Axle Types
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RAS	Recycled Asphalt Shingles
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
R-value	Mede a resistência térmica
SHW	Specification for Highway Work
SI	Sistema Internacional
THDF	Truck Hourly Distribution Factor
(TMDA) <sub>p</sub>	Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados
TTC	Truck Traffic Classification
VCD	Vehicle Class Distribution
WMA	Warm-Mix Asphalt
WRAP	Waste and Resource Action Program

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e motivação

A utilização de materiais reciclados, como alternativa viável à exploração de materiais naturais, surge como uma das temáticas de maior interesse e muito estudadas nos últimos anos. A construção é tradicionalmente um mercado de grande impacto económico e aliar vantagens ambientais a este mercado cria um universo particularmente atraente para explorar.

Segundo os dados do Fórum Internacional de Transportes (ITF), baseados num estudo com os 54 países membros, os valores de investimento em estruturas rodoviárias em 2010, foram de 1510 M€ em novas infraestruturas (este valor não inclui estradas urbanas) e de 102 M€ em manutenção (ITF, acedido em Janeiro de 2015). Apesar das estatísticas sugerirem, no geral, uma diminuição na quota da construção e manutenção (ITF, 2013), a parte do orçamento dos países dedicado às intervenções de construção e manutenção é ainda muito relevante. Continua-se a procurar reduzir os custos, quer sejam de construção de novas estruturas ou de manutenção das existentes, sem descurar a qualidade estrutural e funcional das mesmas.

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são já alvo de reciclagem, ao serem transformados em nova matéria-prima com características adequadas para reutilização em novas estruturas ou reforço. Estes resíduos apresentam diversas vantagens, nomeadamente: (a) ambientais, uma vez que se reutilizam os materiais existentes; e (b) económicas, quer em relação ao próprio material disponível em obra quer em relação ao transporte, se o material for transformado no local da obra. No entanto, os custos gerais associados e a poupança de energia depende do panorama geral da reciclagem no país (Horvath, 2003). A utilização de RCD é uma alternativa viável à utilização dos materiais naturais e apresenta um grande potencial de aplicação enquanto materiais não ligados, em camadas de base, sub-base e de leito do pavimento (Freire, et al., 2013a).

Atualmente, existe já uma experiência de aplicação de RCD em estradas, orientada por especificações técnicas, como são os casos do Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Estradas de Portugal (EP, 2014) e as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC, 2009a e 2009b). Não é só em Portugal que existe disponível este tipo de informação, outros países também já dispõem de guias, até mais desenvolvidos, de aplicação de RCD em camadas não ligadas de pavimento. Contudo, é necessário aprofundar mais esse conhecimento no sentido de um melhor enquadramento à realidade nacional e, desta forma, viabilizar ainda mais a aplicação de RCD.

Neste sentido, o LNEC e o IST desenvolveram o projeto SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias – financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) do Ministério da Educação e Ciência, de forma a contribuir para a aplicação sustentável de RCD em infraestruturas rodoviárias através da utilização destes materiais em camadas granulares não ligadas de base e de sub-base e de leitos de pavimento. A construção de trechos experimentais e a sua instrumentação e observação permitiu conhecer melhor o comportamento mecânico dos RCD estudados nas camadas dos pavimentos experimentais onde foram aplicados. Esta informação pode ser muito útil no desenvolvimento de soluções de pavimentação recorrendo à utilização dos RCD estudados.

Uma contribuição importante para o tema da utilização de materiais reciclados em pavimentos foi, ainda, o trabalho desenvolvido por Rodrigues (2013), no qual se recomendam requisitos técnicos para a utilização de materiais reciclados de RCD em vias municipais e rurais e em valas. Este trabalho foi baseado em normas e estudos de RCD de diferentes países, bem

como, em informações obtidas quer em ensaios laboratoriais quer a partir de obras nacionais, nas quais foram aplicados agregados reciclados de RCD em vias rurais.

Para além dos tradicionais métodos de dimensionamento de pavimentos (método da Shell), correntemente utilizados em Portugal e suportados em métodos de cálculo que consideram leis de comportamento dos materiais muito simples, outros métodos empírico-mecanicistas apresentam-se com grande potencial de aplicação como é o caso do MEPDG, *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (AASHTO, 2008). É um método desenvolvido nos E.U.A. que utiliza modelos de tensões, esforços e deformações no pavimento que tiveram origem em modelos de resposta de pavimentos reais dos quais se observou o seu desempenho (Dzotepe & Ksaibati, 2010). O desempenho previsto para os pavimentos, resultante dos modelos de desempenho desenvolvidos em investigação/laboratório, é ajustado de acordo com aqueles que foram observados para refletir as diferenças entre o desempenho previsto e real (Dzotepe & Ksaibati, 2010). Este método é suportado pela aplicação DARWin-ME e tem vindo a ser estudado e aplicado noutros países

## 1.2 Objetivo geral

Com esta dissertação pretende-se:

- i. analisar e sintetizar o comportamento mecânico dos RCD aplicados nos trechos experimentais do projeto SUPREMA;
- ii. estudar o potencial de utilização da aplicação DARWin-ME (AASHTOWare Pavement ME Design) no dimensionamento de pavimentos rodoviários no contexto da experiência portuguesa;
- iii. conceber e dimensionar estruturas de pavimentos flexíveis incorporando RCD nas camadas não ligadas de base e sub-base;
- iv. propor catálogo de estruturas de pavimentos com RCD nas camadas não ligadas de base e sub-base para estradas de baixo volume de tráfego.

## 1.3 Metodologia

O trabalho desenvolvido nesta dissertação consistiu em:

- informação do projeto SUPREMA relativa à modelação do comportamento dos trechos experimentais (esta informação foi complementada pelo trabalho de Simões (2013), que, inserido numa das atividades do projeto SUPREMA, pretendeu contribuir para uma melhor compreensão do desempenho mecânico dos RCD quando aplicados em camadas não ligadas);
- informação das especificações LNEC – E 473 e E 474 – com o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado na Universidade do Minho (Rodrigues, 2013);
- utilização da aplicação DARWin-ME (AASHTOWare Pavement ME Design) no dimensionamento das soluções de pavimentação propostas, em complemento ao método de dimensionamento da Shell, suportado, por exemplo, na utilização da aplicação BISAR.

Numa primeira fase, estudou-se o projeto SUPREMA (Freire, et al., 2013b), como linha orientadora deste trabalho, e sistematizou-se a informação mais importante resultante da análise dos ensaios de carga com deflectómetro de impacto realizados nas secções experimentais do trecho piloto construídas no âmbito deste projeto. Esta informação foi

extraída quer da consulta de documentos do projeto SUPREMA quer do trabalho de Simões (2013) no âmbito do mesmo projeto.

Para enquadrar o tema, procedeu-se à revisão bibliográfica da reutilização e reciclagem de materiais, nomeadamente Resíduos de Construção e Demolição (RCD), a sua utilização e vantagens de aplicação.

Uma forte componente deste trabalho foi o estudo e utilização da aplicação DARWin-ME, desenvolvida nos E.U.A. que relaciona as degradações do pavimento ao longo do tempo com as propriedades dos materiais, clima e tráfego.

A utilização do DARWin-ME foi validada e comparada com a utilização de método da Shell, de utilização corrente no dimensionamento dos pavimentos em Portugal, e suportada na aplicação BISAR.

Foram modeladas diferentes estruturas de pavimento com RCD, estabelecidas com base na informação dos trechos experimentais do projeto SUPREMA, para as quais se avaliou o comportamento do pavimento ao longo do ciclo de vida e, conseqüentemente, a sua viabilidade de utilização em diferentes contextos de fundação, tráfego e clima.

Por fim, construíram-se catálogos de pavimentos-tipo, considerando-se a utilização de materiais reciclados em camadas de base e sub-base em pavimentos flexíveis, e que poderá servir de linha orientadora à implementação deste tipo de materiais em Portugal (em estradas com baixo volume de tráfego).

## 1.4 Estrutura

O trabalho divide-se em 5 capítulos.

No capítulo 1 “Introdução” é feita a introdução ao tema da dissertação, a apresentação dos objetivos que esta dissertação se propõe atingir e a descrição da metodologia utilizada para os alcançar. Apresenta-se ainda a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 “Reciclagem de materiais” procede-se à revisão da literatura existente relativa: (a) ao enquadramento nacional e internacional da realidade da reciclagem de RCD nos diferentes países e legislação aplicada; (b) aos materiais reciclados, no qual se identificaram vantagens, características e metodologias de classificação dos materiais em Portugal e Espanha; (c) ao projeto SUPREMA, onde se elaborou um pequeno resumo e se identificaram os dados recolhidos essenciais à elaboração deste trabalho.

No capítulo 3 “Dimensionamento de pavimentos segundo a AASHTO” descreve-se e caracteriza-se o MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), método empírico-mecanicista de projeto rodoviário, aplicado ao cálculo do desempenho dos pavimentos e sobre o qual se dão a conhecer os objetivos, dados gerais, *inputs* e *outputs* da aplicação DARWin-ME, baseado no método MEPDG.

No capítulo 4 “Proposta de estruturas-tipo de pavimentos com RCD em camadas não ligadas” classificam-se os materiais reciclados (RCD) de acordo com as especificações LNEC E 473 e LNEC E 474, bem como de acordo com uma proposta de alteração às normas LNEC para utilização de RCD em vias municipais e rurais e em valas (Rodrigues, 2013) e ainda segundo o guia espanhol GEAR (GERD, 2011); foram apresentadas informações relativas ao pavimento, fundação, tráfego e condições climáticas, que serviram de base à escolha das estruturas-tipo. Analisaram-se os cenários escolhidos com recurso às metodologias Shell e MEPDG (com recurso às aplicações BISAR e DARWin-ME, respetivamente) a fim de encontrar as estruturas

## Introdução

de pavimento mais indicadas para as condições descritas. Apresenta-se a informação obtida de forma estruturada, em quadros, e que constituirá um ponto de partida à aplicação de materiais reciclados em pavimentos rodoviários.

No capítulo 5 “Conclusão” apresenta-se a síntese do trabalho desenvolvido e as principais conclusões alcançadas, baseadas essencialmente na aplicação dos catálogos de materiais reciclados a pavimentos flexíveis, bem como algumas considerações futuras, para enriquecimento desta área.

Em anexo agrega-se informação complementar ao corpo de texto, nomeadamente: informação de *input* da aplicação DARWin-Me relativa a materiais, tráfego e condições climáticas (Anexos I - III); classificação pormenorizada dos RCD de acordo com as especificações LNEC E 473 e LNEC E 474, guia para a utilização de RCD em vias municipais e rurais e em valas e guia espanhol (Anexo IV); dados de *input* relativos ao dimensionamento das estruturas de pavimento segundo o método da Shell (Anexo V); dados de material e tráfego utilizados no dimensionamento das estruturas de pavimento, segundo a metodologia MEPDG (Anexos VI e VII); e ,ainda, os *outputs* das aplicações BISAR e DARWin-Me relativos ao dimensionamento das estruturas de pavimento (Anexos VIII e IX, respetivamente).

## 2 Reciclagem de materiais

### 2.1 Utilização de agregados reciclados

A reciclagem de materiais representa uma forma de converter um resíduo num recurso (Sirigiripet, 2007). É uma realidade cada vez maior na prática da engenharia e acarreta vantagens transversais, nomeadamente ambientais, económicas e sociais.

A reciclagem, em termos ambientais, tem o potencial de: (1) aumentar o período de vida de um recurso natural, complementando desta forma a oferta de recursos; (2) reduzir a quantidade de resíduos de construção espalhados em terrenos e a perturbação ambiental em redor dos locais de construção; (3) aumentar o desenvolvimento sustentável dos recursos naturais, uma vez que se reduz o seu ritmo de consumo (Sirigiripet, 2007).

As vantagens a nível económico traduzem-se (1) no desenvolvimento da indústria de reciclagem, logo criação de mais postos de trabalho; (2) na redução da dependência das matérias-primas, e conseqüente concorrência de preços; (3) na redução do custo de deposição em aterro e transporte dos materiais (Spies, 2009), pressionada pela reciclagem *in situ*. Em 2006, o estudo de uma estrutura rodoviária no sul do Chile mostrou que a reciclagem *in situ* com betume espuma reduz o consumo de materiais e combustíveis e concluiu que se o local de extração ou armazenamento se localizar a cerca de 200 km de distância da secção a reabilitar, a energia consumida para a reconstrução do pavimento (7 cm em betão betuminoso, 15 cm em camada de base e 15 cm em camada de sub-base, ambas granulares) será cerca de 300 % maior que a necessária para a reciclagem do mesmo (Thenoux, et al., 2006). Apesar da dependência dos custos locais que condicionam a análise económica da reciclagem, este estudo mostra que a reciclagem pode ter vantagens económicas passíveis de explorar.

A nível social as vantagens prendem-se com a melhor utilização de espaços públicos e melhoria da saúde pública (Spies, 2009).

Nos E.U.A., um inquérito levado a cabo pela National Asphalt Pavement Association (NAPA) mostra que a quantidade usada de misturas betuminosas recuperadas (RAP), passou de  $56,0 \times 10^6$  ton em 2009 para  $68,3 \times 10^6$  ton em 2012 (Hansen & Copeland, 2012), correspondendo a um crescimento de 22 %. Neste estudo, também se refere que 98 % das empresas afirma usar RAP nas suas misturas betuminosas.

Em 2012, foram produzidos cerca de  $9,5 \times 10^6$  ton de resíduos em Portugal, resultantes da atividade económica em geral (INE, 2014). Espera-se que a reciclagem consiga e continue a absorver parte significativa desta quantidade de resíduos.

A reutilização é a opção mais desejável em comparação com a reciclagem, porque é mais eficaz na redução do desperdício e na procura de recursos. Ao ser reutilizado, o material recuperado não sofre qualquer tipo de processamento, ao contrário da reciclagem, em que o material usado é reprocessado para a produção de um novo produto similar ou diferente (Mália, 2010).

A legislação já prevê o enfoque na reutilização, admitindo uma priorização que indica que um material só deve ser reciclado se não for possível a reutilização. Também responsabiliza o produtor do bem relativamente ao produto o que tem maior impacto em todo o ciclo de vida do material, incentivando alterações na conceção do produto, maximizando a poupança de matérias-primas e, minimizando a produção de resíduos (APA, acedido em Fevereiro de 2015).

A noção de reutilizar e atribuir responsabilidades ao produtor leva também a que se comecem a projetar e construir estruturas de modo a permitir a sua desconstrução e capacidade de adaptação a novos componentes e materiais, incluindo os materiais reciclados (van der Meer, et al., 2006).

## **2.2 Utilização de Resíduos de Construção e Demolição**

### **2.2.1 Gestão e legislação de resíduos**

A construção civil, apesar da estagnação que atravessa na atualidade, continua a ser um dos setores base na sociedade e na economia atual. É uma fonte de resíduos e origina agregados com constituições heterogêneas, frações com dimensões variadas e diferentes níveis de perigosidade (APA, acessado em Fevereiro de 2015). Isto resulta de uma grande diversidade de fatores, nomeadamente a localização, o tipo e a fase da obra, os equipamentos e os processos utilizados na construção e demolição (Mália, 2010).

Segundo Mália (2010) a fração mais importante dos RCD é a dos materiais inertes, representando mais de 50 % do volume total de resíduos (quando não são contabilizados os solos de escavação e as lamas de dragagem e perfuração esta fração é geralmente superior a 80 %).

A heterogeneidade dos materiais associada ao caráter temporário e geograficamente disperso da construção dificulta o cumprimento de legislação, fiscalização e, mais importante, a reutilização ou reciclagem dos materiais em outra obra.

O primeiro passo para a correta gestão deste tipo de resíduos passa por determinar a sua quantidade (Lage, et al., 2010). A aplicação de uma plataforma de comunicação entre ambas as partes interessadas valorizava este tema e prevenia a sua deposição em baldio não considerado.

Tem-se vindo a criar legislação europeia que pretende disseminar medidas de reciclagem para que todos os países contribuam para um bem comum, como medida de sustentabilidade. Estes instrumentos dão já frutos no panorama europeu.

Em 1975, surgiu a Diretiva 75/442/CEE que, como primeira legislação europeia de resíduos, pretendia: (a) promover a prevenção, a reciclagem e a transformação de resíduos; e (b) incentivar o tratamento de resíduos com vista à sua reciclagem a fim de preservar os recursos naturais (UE, acessado em Fevereiro de 2015). Esta diretiva é posteriormente alterada pela diretiva 91/156/CEE, em 1991.

Em 2008, foi publicada a Diretiva 2008/98/CEE que, como qualquer política em matéria de resíduos, pretendia minimizar o impacto negativo da produção e gestão de resíduos na saúde humana e no ambiente. Os principais aspetos em que se apoiava eram: (a) estabelecer os requisitos essenciais para a gestão de resíduos; (b) definir princípios fundamentais, como a obrigação de tratamento dos resíduos de forma a que não acarretem impactos negativos no ambiente e na saúde humana; (c) hierarquizar os resíduos; e (d) de acordo com o princípio do “poluidor-pagador”, exigir que os custos da eliminação dos resíduos sejam suportados pelo seu detentor atual, pelos anteriores detentores dos resíduos ou pelos produtores do produto que deu origem aos resíduos (UE, acessado em Fevereiro de 2015). Com esta diretiva o Parlamento Europeu estabelece para 2020 a meta de 70 %, ou seja, deve-se preparar a reutilização, reciclagem e valorização de materiais (num mínimo de 70 % do peso total), incluindo



operações de resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão de materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 da lista de resíduos (APA, acedido em Fevereiro de 2015).

A Comissão Europeia, em 2012, publicou um estudo no qual indica que são gerados, em média, 850 milhões de toneladas de RCD na UE por ano, ou seja, 31 % dos resíduos totais gerados na UE (Watkins, et al., 2012). O mesmo estudo, apresenta ainda que a percentagem de reciclagem difere de país para país, no entanto, refere que em 2004 (ano para o qual existe um maior número de dados disponíveis) a taxa de reciclagem de 60 % ou maior é atingida em apenas 10 dos países representados na UE-27 (Watkins, et al., 2012).

Todos estes dados mostram que ainda existe um longo caminho a percorrer no sentido de implementar medidas e sensibilizar as empresas e população da importância da reciclagem de agregados em novos projetos, aproveitando as vantagens económicas, sociais e ambientais deste gesto.

## 2.2.2 Enquadramento nacional

A legislação relativa à reutilização e reciclagem de RCD em Portugal tem sofrido algumas alterações significativas, o que tem levado à readaptação das empresas de construção e entidades que trabalham direta ou indiretamente no setor da construção.

Em 2004, a Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, adotou para o normativo nacional a Lista Europeia de Resíduos, LER, conforme Decisão n.º 2000/532/CE, da Comissão, de 3 de Maio, alterada pelas Decisões n.º 2001/118/CE, n.º 2001/119/CE e n.º 2001/573/CE. Esta lista assegura a harmonização do normativo vigente em matéria de identificação e classificação de resíduos (INCM, acedido em Fevereiro de 2015). Os materiais RCD estão identificados no capítulo 17 e são identificados por um código de 6 dígitos, dos quais, os dois primeiros dizem respeito aos capítulos e estão organizados de acordo com a fonte geradora do resíduo.

Após a identificação dos resíduos, tornou-se necessário estruturar e definir uma boa gestão dos mesmos. Em 2008 foi publicado o Decreto-Lei n.º 46/2008 que estabelece o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras, de demolições de edifícios ou de derrocadas. Compreende, assim, a prevenção, reutilização e operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação dos resíduos.

Em 2011, foi publicado o Decreto-Lei n.º 73/2011 que pretende promover o pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos como forma de consolidar a valorização dos resíduos e estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização. Transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE e altera o regime geral da gestão de resíduos e vários diplomas legais, nomeadamente, o Decreto-Lei n.º 46/2008.

Apesar das diretivas publicadas, a União Europeia não emanou legislação específica para os RCD (APA, acedido em Fevereiro de 2015). As diretivas orientam os países membros mas permitem critérios diferentes na caracterização e aplicação dos materiais a definir pelos respetivos países.

O LNEC desenvolveu um conjunto de especificações que estabelecem as condições de utilização de materiais provenientes de RCD em obras de engenharia civil:

- LNEC E 471 – 2009: Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos

- LNEC E 472 – 2009: Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central
- LNEC E 473 – 2009: Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos
- LNEC E 474 – 2009: Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte

Estas especificações respondem à necessidade de definir requisitos para aplicação de RCD, em particular em camadas de base e sub-base não ligadas de pavimentos rodoviários, no âmbito da implementação do DL n.º 46/2008 (LNEC, 2009a). Este resíduos, catalogados no capítulo 17 da LER, transportada para a Portaria n.º 209/2004, apresentam uma composição muito variável e devem ser alvo de uma triagem e seleção apropriadas, produzindo agregados reciclados de qualidade.

A caracterização dos materiais e a aplicação dos mesmos em estruturas de pavimento, objeto de estudo nesta dissertação, teve como base as especificações LNEC E 473 e LNEC E 474, cujo conteúdo foi resumido e é apresentado em seguida.

#### a. Camadas não ligadas de pavimentos

A utilização de RCD em camadas não ligadas de pavimentos está enquadrada pela especificação LNEC E 473 que permite definir o campo de aplicação dos agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimento (base e sub-base), com base na classificação e categorização correta do agregado reciclado e tendo em conta, também, o tráfego médio diário de pesados por via.

Na classificação dos agregados, a especificação avalia os constituintes da mistura reciclada e analisa a proporção relativa dos mesmos na mistura, conforme apresentado no Quadro 2.1. A constituição dos RCD deve ser avaliada de acordo com o procedimento preconizado na EN 933-11 + AC: 2009 (LNEC, 2009a).

Quadro 2.1 – Classificação dos agregados, segundo a especificação LNEC E 473.

Classe	Proporção dos constituintes					
	Rc+Ru+Rg	Rg	Rb	Ra	FL	X
B	≥ 90	≤ 5	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
C	≥ 50	≤ 5	≤ 10	≤ 30	≤ 5	≤ 1

Legenda: R<sub>a</sub> (%) – Material betuminoso; R<sub>b</sub> (%) – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; R<sub>c</sub> (%) – Betão, produtos de betão e argamassas; R<sub>g</sub> (%) – Vidro; R<sub>u</sub> (%) – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; X (%) – Madeira, metal ferroso e não ferroso, borracha, gesso, partículas de argila e solo; FL (cm<sup>3</sup>/kg) – Volume de material flutuante.

Os agregados devem também satisfazer propriedade e requisitos mínimos para que se espere um desempenho adequado das camadas do pavimento rodoviário. O Quadro 2.2 apresenta os requisitos de conformidade e as normas de ensaio a realizar. Os materiais que não satisfaçam os requisitos previstos na especificação LNEC E 473 podem vir a ser utilizados, desde que se comprove o seu adequado desempenho através de estudo específico (LNEC, 2009a).

Os agregados que se encaixam na classificação anterior podem em geral ser utilizados em camadas de base e sub-base, conforme estabelecido no Quadro 2.3, tendo ainda em conta o tráfego médio diário de pesados por via.

Quadro 2.2 – Propriedades e requisitos mínimos dos agregados reciclados para aplicação em camadas não ligadas de pavimentos (especificação LNEC E 473).

Requisitos de conformidade			Agregados reciclados		
Parâm.	Propriedade	Norma de ensaio	AGER1 B ou C	AGER 2 B ou C	AGER 3 B ou C
Geométricos e de natureza	Dimensão	EN 13285	0/31,5	0/31,5	0/31,5
	Sobretamanhos (EN 933-1+A1)	EN 13285	OC <sub>75</sub>	OC <sub>80</sub>	OC <sub>85</sub>
	Classe de granulometria (EN 933-1+A1)	EN 13285	G <sub>B</sub>	G <sub>B</sub>	G <sub>A</sub>
	Teor de finos (EN 933-1+A1)	EN 13285	UF <sub>9</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>9</sub> LF <sub>2</sub>	UF <sub>9</sub> LF <sub>2</sub>
	Qualidade dos finos (EN 933-9)*	EN 13242+A1	MB <sub>0/D</sub> ≤1,0	MB <sub>0/D</sub> ≤1,0	MB <sub>0/D</sub> ≤1,0
	Percentagem de partículas totalmente esmagadas ou partidas e totalmente roladas em agregados grossos (EN933-5)	EN 13242+A1	C <sub>50/30</sub>	C <sub>50/10</sub>	C <sub>90/3</sub>
Comport. mecânico	Resistência à fragmentação e resistência ao desgaste (EN 1097-2 e EN 1097-1)	EN 13242+A1	LA <sub>45</sub> e MDE <sub>45</sub> ou LA+MDE≤85	LA <sub>45</sub> e MDE <sub>45</sub> ou LA+MDE≤85	LA <sub>45</sub> e MDE <sub>45</sub> ou LA+MDE≤85
Químicos	Teor de sulfatos solúveis em água (EN 1744-1)	EN 13242+A1	SS <sub>0,7</sub>	SS <sub>0,7</sub>	SS <sub>0,7</sub>
	Libertação de substâncias perigosas (EN 12457-4)**	-	Classificação como resíduos para deposição em aterro de resíduos inertes***		

\* MB<sub>0/D</sub> – valor de azul de metileno expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9 multiplicado pela percentagem da fração passada no peneiro de 2 mm. \*\* Para teores de sulfatos superiores a 0,2 %, estes agregados deverão ser colocados a uma distância não inferior a 0,50 m de elementos estruturais de betão. \*\*\* A classificação baseia-se apenas nos resultados do ensaio de lixivação para L/S=10 l/kg – secção 2.1.2.1 da Decisão do Conselho 2003/33/CE.

Quadro 2.3 – Campo de aplicação dos agregados reciclados em camadas não-ligadas de pavimentos, segundo a especificação LNEC E 473.

Categoria	AGER1		AGER2		AGER3
	C	B	C	B	B
Aplicação em camadas de sub-base - TMDp	≤ 50	≤ 150	≤ 150	≤ 300	≤ 300
Aplicação em camadas de base - TMDp	NR	≤ 150	≤ 150	≤ 150	≤ 300

Legenda: TMDp – tráfego médio diário de pesados por via; NR – não recomendado.

### b. Aterros e leito do pavimento

A utilização de RCD em aterros e leito do pavimento está enquadrada pela especificação LNEC E 474 que fornece recomendações e estabelece requisitos mínimos para a utilização de

materiais reciclados provenientes de RCD em aterro e leito do pavimento das infraestruturas de transporte (LNEC, 2009b).

Os agregados provenientes da construção e demolição, abrangidos por esta especificação, são classificados segundo a proporção relativa de cada um dos seus constituintes, conforme indicado no Quadro 2.4 e podem ser agrupados em 3 classes (B, MB e C).

Quadro 2.4 – Classificação dos agregados, segundo a especificação LNEC E 474.

Classe	Proporção dos constituintes					
	Rc+Ru+Rg	Rg	Rb	Ra	FL	X
B	≥ 90	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
MB	≤ 70	≤ 25	≤ 70	≥ 30	≤ 5	≤ 1
C	Sem limite	≤ 25	Sem limite	≤ 30	≤ 5	≤ 1

Legenda: R<sub>a</sub> (%) – Material betuminoso; R<sub>b</sub> (%) – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; R<sub>c</sub> (%) – Betão, produtos de betão e argamassas; R<sub>g</sub> (%) – Vidro; R<sub>u</sub> (%) – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; X (%) – Madeira, metal ferroso e não ferroso, borracha, gesso, partículas de argila e solo; FL (cm<sup>3</sup>/kg) – Volume de material flutuante.

No que se refere às características geotécnicas estes materiais classificam-se segundo dois grupos (MAT1 e MAT2). As propriedades, normas de ensaio e correspondentes limites podem ser consultadas no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Propriedades e requisitos mínimos de conformidade dos materiais reciclados para aplicação em aterro e camada de leito (especificação LNEC E 474).

Requisitos de conformidade			Agregados reciclados		
Parâmetros	Propriedade	Norma de ensaio	MAT1	MAT2	
			B, MB e C	B e C	MB
Geométricos e de natureza	Dimensão máxima das partículas (D <sub>max</sub> )	-	D <sub>max</sub> ≤150mm	D <sub>max</sub> ≤80mm	
	Conteúdo máximo em finos (passado no peneiro 80 µm)	LNEC E-196	10%	10%	
	Qualidade dos finos*	EN 933-9	MB <sub>0/D</sub> <2	MB <sub>0/D</sub> <1	
Comportamento mecânico	Resistência à fragmentação	EN 1097-2+A1	-	LA≤45	-
	Resistência ao desgaste	EN 1097-1+A1		MDE≤45	
Químicos	Teor de sulfatos solúveis em água**	EN 1744-1	0,7%	0,7%	
	Libertação de substâncias perigosas***	EN 12457-4	Classificação como resíduos para deposição em aterro para resíduos inertes		

\* MB<sub>0/D</sub> – valor de azul de metileno expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9 multiplicado pela percentagem da fração passada no peneiro de 2 mm. \*\* Para teores de sulfatos superiores a 0,2 %, estes materiais deverão ser colocados a uma distância não inferior a 0,50 m de elementos estruturais de betão. \*\*\* A classificação baseia-se apenas nos resultados do ensaio de lixivação para L/S=10 l/kg – secção 2.1.2.1 da Decisão do Conselho 2003/33/CE.

Caso os resíduos apresentem características e propriedades que se integrem dentro dos limites estabelecidos, fica comprovada a sua adequabilidade e desempenho para aplicação em

camadas de aterro e leito do pavimento. O Quadro 2.6 mostra que os materiais do tipo MAT1 são passíveis de utilização em aterro e os do tipo MAT2 podem ser utilizados em aterro e camada de leito, à exceção da classe MB.

Quadro 2.6 – Campo de aplicação dos materiais MAT1 e MAT2 em aterro e leito do pavimento, segundo a especificação LNEC E 474.

Categoria	MAT1			MAT2		
	B	MB	C	B	MB	C
Camada de leito	x	x	x	✓	x	✓
Aterro	✓	✓	✓	✓	✓	✓

As condições de colocação e compactação destes materiais são semelhantes às preconizadas para os materiais naturais com características geotécnicas semelhantes (LNEC, 2009b).

### c. Vias municipais e rurais e valas

Com vista à utilização de RCD em vias municipais e rurais e em valas, Rodrigues (2013) reviu as normas relativas ao uso de materiais reciclados de vários países e, com base nas especificações LNEC, propôs uma nova abordagem para classificação dos constituintes dos agregados, requisitos e propriedades dos mesmos, bem como um novo campo de aplicação.

A classificação dos constituintes é igual às encontradas nas especificações LNEC E 473 e LNEC E 474. Para facilitar a denominação das classes, uma vez que as especificações têm classes com o mesmo nome, Rodrigues (2013) faz corresponder a nova denominação de B1 e C1 às classes B e C da especificação LNEC E 473, respetivamente.

Relativamente às propriedades e requisitos mínimos, Rodrigues (2013) apresenta um quadro baseado em informação recolhida quer das especificações LNEC quer de documentação europeia consultada, nomeadamente, Reino Unido, França e Espanha. Os requisitos e valores limites associados podem ser consultados no Quadro 2.7.

Os agregados reciclados que não cumpram os requisitos acima podem ser alvo de correção quer em termos granulométricos quer em termos de mistura com outros agregados para cumprir os requisitos considerados.

A proposta de campo de aplicação dos agregados reciclados abrange todas as camadas, desde o aterro à camada de desgaste não revestida, e pode ser consultada no Quadro 2.8.

## 2.2.3 Enquadramento internacional

A promoção da utilização de agregados reciclados, provenientes da construção e demolição, resultou na criação de especificações nos diferentes países da Europa. No entanto, diversos fatores, nomeadamente sócio-cultural, geográfico ou quantidade de matéria-prima disponível levaram a que os países abordassem o tema da reciclagem de várias formas. Assiste-se hoje em dia a diferentes patamares de implementação, alguns dos quais com inclusão das autarquias locais para desenvolvimento de orientações adaptadas à economia local, outros com as autoridades nacionais, no quais as medidas são bem estruturadas e contam com multas avultadas em caso de desrespeito.

Quadro 2.7 – Requisitos de conformidade (Rodrigues, 2013).

Propriedade	Norma	Aterro	Leito pavim. / sub-base	Base	Camada desgaste
Categoria		AR1	AR2	AR3	AR4
Classe		B MB C	B MB C	B1 C1	B1 C1
<b>Parâmetros geométricos e de natureza</b>					
Dimensão máxima, mm	NP EN 933-1	$D_{\text{máx}} < 2/3$ da espessura da camada	80	40	40
Teor de finos (passado no # 0,063 mm), %	NP EN 933-1	-	$\leq 15$	$\leq 10$	$\leq 9$
Equivalente de areia, %	NP EN 933-8	-	EA $\geq 30$ ou	EA $\geq 50$ ou	EA $\geq 50$ ou
Azul de metileno <sup>(1)</sup> , %	NP EN 933-9	-	MB <sub>0/D</sub> < 2,5	MB <sub>0/D</sub> < 2,0	MB <sub>0/D</sub> < 2,0
<b>Parâmetros de comportamento mecânico</b>					
Resistência à fragmentação (LA), %	NP EN 1097-1	-	LA $\leq 50$	LA $\leq 45$ ou	LA $\leq 40$ ou
Resistência ao desgaste (MDE), %	NP EN 1097-2	-	-	MDE $\leq 45$	MDE $\leq 40$
Índice de fragmentabilidade (FR), %	NF P 94-066	$\leq 7$	-	-	-
<b>Parâmetros químicos</b>					
Teor de sulfatos solúveis em água <sup>(2)</sup> , %	EN 1744-1	$\leq 0,7$			
Libertação de substâncias perigosas	EN 12457-4	Classificação como resíduos para deposição em aterros para resíduos inertes <sup>(3)</sup>			

<sup>(1)</sup> O valor de azul de metileno, MB<sub>0/D</sub>, é expresso em g/kg segundo a norma de ensaio EN 933-9 multiplicado pela percentagem da fração passada no peneiro de 2 mm; <sup>(2)</sup> Para teores de sulfatos superiores a 0,2 %, estes materiais deverão ser colocados a uma distância não inferior a 0,50m de elementos estruturais de betão; <sup>(3)</sup> A classificação baseia-se apenas nos resultados do ensaio de lixiviação para L/S = 10 l/kg – anexo IV do Decreto-Lei n.º 183/2009.

Quadro 2.8 - Campo de aplicação dos agregados reciclados (Rodrigues, 2013).

Categoria / Classe	Aplicação
AR1 / B, MB ou C	Aterro
AR2 / B, MB ou C	Leito do pavimento / sub-base
AR3 / B1 ou C1	Base
AR4 / B1 ou C1	Camadas de desgaste em camadas traficadas não revestidas

No Reino Unido existe legislação para controle dos resíduos produzidos. A construção da rede viária estratégica nacional no Reino Unido é regulada pela especificação SHW, “Specification for Highway Work”, desenvolvida pelo Departamento dos Transportes e a qual define os padrões exigidos aos materiais na construção e manutenção das infraestruturas rodoviárias. Surge como o 1º volume do livro MCHW, “Manual of Contract Documents for Highway Works”,

e é composto por 27 cláusulas agrupadas por tema. Está disponível para *download* no *site* do Ministério dos Transportes do Reino Unido (GOV.UK, acessado em Fevereiro de 2015b).

A série 700 contempla os pavimentos rodoviários. Esta série define as espessuras das camadas do pavimento e tolerâncias, os materiais e métodos de construção das camadas do pavimento, bem como, a metodologia de ensaios para os constituintes das misturas de agregados reciclados, esta última especificada na cláusula 710.

A série 800 é relativa às misturas não-ligadas, com cimento ou outros ligantes hidráulicos. Esta série prescreve o tipo de material adequado para as camadas de sub-base e ensaios necessários. As misturas não-ligadas são classificadas como tipo 1, 2, 3 ou 4 ou categoria B, dependendo quer do conteúdo do agregado, nomeadamente, vidro, madeira ou plástico, quer das proporções de agregado reciclado permitido.

Para auxiliar a legislação em vigor foram ainda criados outros programas que promovem a reciclagem e dão a conhecer os procedimentos levados a cabo no Reino Unido para os agregados que têm a sua origem na construção e demolição de estruturas como, por exemplo, o programa WRAP e o programa CoST.

O programa WRAP, “Waste and Resource Action Programme”, criado por membros do setor, tem como missão acelerar a mudança para uma economia de recursos sustentável: (a) reinventando o trabalho, como produzir e vender produtos; (b) alterando a mentalidade de consumo; e (c) redefinindo o resultado da reutilização e reciclagem (WRAP, acessado em Fevereiro de 2015). Este programa trabalha com os financiadores para apoiar as suas políticas e intervém nas áreas onde se espera o maior impacto na redução de resíduos e proteção de recursos naturais, proporcionando assim benefícios económicos e ambientais (WRAP, acessado em Fevereiro de 2015). Deste programa saiu um Protocolo de Qualidade que define o procedimento seguido neste país para a produção da maior parte dos agregados reciclados utilizados na construção (Rodrigues, 2013).

Mais recente, o programa CoST, “Construction Sector Transparency Initiative”, lançado em Maio de 2008, suportado pela DFID e pelo Banco Mundial, tem como objetivo enfrentar alguns dos problemas endémicos da construção pública (GOV.UK, acessado em Fevereiro de 2015a). Pretende explorar a transparência dos projetos de construção e reduzir a má gestão, desperdício e corrupção que são comuns na construção (GOV.UK, acessado em Fevereiro de 2015a).

Em França, foi definido como meta para o ano de 2000 reciclar 50 % dos resíduos de construção e demolição gerados (Magalhães, et al., 2010). Em 2004, a França apresentava já uma taxa de reciclagem de RCD acima dos 60 %, crescendo face à meta definida quatro anos antes. Em 2009, o Ministério do Ambiente (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, MEEDDAT) assinou um acordo com os principais sindicatos, no qual se propõe a olhar para alguns pontos menos explorados da reciclagem de RCD, nomeadamente reutilização de materiais provenientes de estradas, e a alcançar um objetivo de 60 % de reutilização de estradas em centrais de mistura betuminosa em 2012 (Rodrigues, 2013).

A política francesa aposta numa gestão regional de resíduos, adaptada à realidade local. São elaborados guias técnicos de acordo com as características da reciclagem na região. Estes guias serviram de base à Note d'information n.º 22, de 2011 (IDRRIM, acessado em Fevereiro de 2015), criada para facilitar a utilização de materiais reciclados a nível nacional.

Os requisitos para caracterização dos agregados reciclados em pavimentos rodoviários podem ser encontrados nas normas NF P 11-300 e guia técnico “Guide des Terrassements Routiers (GTR) pour la réalisation de remblais et des couches de forme”, para camadas de leito do



pavimento e aterro, e nas normas XP P 18-545, NF EN 13242 e NF EN 13285, nas camadas de base e sub-base (Rodrigues, 2013).

A Espanha apresenta ainda valores de taxas de reciclagem abaixo da média europeia. Dados de 2006, mostram que existiam, em Espanha, cerca de 45 milhões de toneladas de RCD (sem contar com os solos de escavação), dos quais 50 % foram eliminados sem tratamento e apenas 3 milhões de toneladas foram reciclados, ou seja, menos de 7 % (adaptado de Mália, 2010; Institution of Civil Engineers, 2009).

Este país partilha muitas das condições portuguesas devido maioritariamente à sua posição geográfica: (a) as condições atmosféricas e riqueza do solo deram origem a muita matéria-prima, e conseqüente, acesso fácil a agregado natural; (b) o relevo destes países, nomeadamente no interior, dificulta o acesso a alguns locais, impossibilitando o transporte de agregados reciclados das grandes cidades, onde se produz maior número de resíduos. Acresce ainda a falta de medidas punitivas, que aliadas ao difícil controle destas políticas por parte das entidades competentes dão origem a resultados fracos e valores baixos de reciclagem de resíduos face a outros países.

A legislação vigente em Espanha é o Decreto-Lei n.º 105/2008, relativo à produção e gestão de resíduos provenientes da construção e demolição, e a resolução de 20 de Janeiro de 2009 que aprova o Plano Nacional Integrado de Resíduos 2008-2015. A apoiar este normativo está o Guia Espanhol de Agregados Reciclados (GEAR), elaborado pela Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD) e que, tal como as especificações portuguesas LNEC, no qual se baseia, permite classificar os agregados e recomenda aplicação específica de acordo com os requisitos cumpridos.

A Holanda, Dinamarca ou Alemanha são países com elevadas taxas de reciclagem. A Alemanha, por exemplo, é um dos países mais desenvolvidos nesta matéria e pioneira na área de gestão de resíduos (Spadotto, et al., 2012). A sua política consiste em evitar a criação de resíduos; sendo que, se não se conseguir evitar, o resíduo deve ser valorizado e reciclado e, caso não possa ser reciclado, deve ser eliminado da forma mais ambientalmente correta possível (Spadotto, et al., 2012).

A Alemanha possui regulamentação sobre reciclagem desde 1986 (Lei de Minimização e Eliminação de Resíduos). Esta lei foi mais tarde substituída pela Lei de Economia de Ciclo Integral e Gestão de Resíduos (1994) que confere maiores responsabilidades aos fabricantes. Estes passaram a ser responsáveis pelo seu produto desde o fabrico, passando pela distribuição e uso até à sua eliminação. No decorrer desta nova lei, surgiram grupos de empresas e associações, sem fins lucrativos, com a responsabilidade de recolher os resíduos resultantes da fabricação dos produtos *core* das empresas.

A Europa reflete o panorama do resto do mundo em relação à reciclagem, alguns países mais atentos a este tema conseguem já ter consolidadas as suas políticas e integram no dia-a-dia dos cidadãos e empresas a reciclagem dos materiais.

Potências mundiais como o Japão e os Estados Unidos desenvolveram metodologias diferentes para abordar o tema. O Japão, devido aos grandes avanços tecnológicos, é reconhecido como o país mais adiantado em técnicas de demolição adequadas às necessidades de gestão do meio ambiente e os Estados Unidos, por sua vez, possuem um elevado número de instalações de reciclagem distribuídas por todo o país (Magalhães, et al., 2010).

No Brasil, a reciclagem de RCD ainda não tem expressão, com exceção da intensa reciclagem já praticada pelas indústrias de cimento e de aço, mesmo com a escassez de agregados e de



áreas para aterros. Este atraso dá-se devido aos repetidos problemas económicos e problemas sociais, objeto das discussões políticas atuais (Ângulo, et al., 2007).

De acordo com a edição 2010 do Panorama dos Resíduos Sólidos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), os municípios brasileiros recolheram cerca de 31 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, 8,7 % a mais do que em 2009 (Spadotto, et al., 2012). Estes valores são elevados, nomeadamente se se associar a recolha das câmaras municipais maioritariamente a resíduos abandonados de forma indevida em locais públicos.

A principal legislação existente é a resolução n.º 307, de 5 de julho de 2002, do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), cujo intuito é o de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil e a norma NBR 10004, de 2004, da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que visa classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais para o meio ambiente e para a saúde pública.

### a. Guia espanhol

A Espanha tem realizado esforços nos últimos anos para acompanhar a política da reciclagem proposta a nível europeu. Desenvolveu guias, baseados em publicações de outros países, nomeadamente Portugal. A sua proximidade geográfica e as características semelhantes da matéria-prima resulta numa política tão próxima que as suas bases para caracterização e aplicabilidade dos agregados reciclados são alvo de escrutínio nesta dissertação.

Aplicam-se, assim, as recomendações técnicas espanholas relativas a agregados reciclados de matéria inorgânica, procedentes de resíduos de construção e demolição, passíveis de serem utilizados em camadas granulares de pavimentos rodoviários.

A legislação e normativas técnicas vigentes em Espanha, e aqui contempladas, são a norma UNE EN 13242 e o Art. 510 Ordem FOM/891/2004, de 1 de Março.

A constituição dos agregados ajuda a classificar as suas características físico-mecânicas e baseia-se na norma europeia EN 933-11, também em uso em Portugal. O Quadro 2.9 apresenta a sua classificação segundo classes (em Espanha são denominadas categorias, no entanto, neste trabalho ir-se-ão denominar classes para que sejam comparáveis à metodologia portuguesa).

Quadro 2.9 – Classe dos agregados reciclados provenientes de RCD (GERD, 2011).

Classe	Descrição	Proporção dos constituintes			
		Rc+Ru	Rb	Ra	X
ARH	Agregado reciclado de betão	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 1
ARMh	Agregado reciclado misto de betão	≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1
ARMc	Agregado reciclado misto de alvenaria	< 70	> 30	≤ 5	≤ 1
ARMa	Agregado reciclado misto com betuminoso	-	-	5 - 30	≤ 1

Legenda: R<sub>a</sub> (%) – Material betuminoso; R<sub>b</sub> (%) – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; R<sub>c</sub> (%) – Betão, produtos de betão e argamassas; R<sub>u</sub> (%) – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; X (%) – Madeira, metal ferroso e não ferroso, borracha, gesso, partículas de argila e solo.

No guia espanhol são apresentadas diferentes tabelas que pretendem classificar os agregados de acordo com requisitos geométricos, físico-mecânicos, químicos e ambientais. Após uma classificação detalhado é-nos apresentada uma tabela resumo, conforme o Quadro 2.10, onde se podem consultar todos os requisitos técnicos relevantes e categorias (em Espanha são denominadas classes, no entanto, neste trabalho ir-se-ão denominar categorias para que sejam comparáveis à metodologia portuguesa).

Quadro 2.10 – Resumo dos requisitos técnicos (GERD, 2011).

Requisitos técnicos	Categoria / Aplicação			
	Categ 1	Categ 2	Categ 3	Categ 4
Granulometria	(GERD, 2011, p. 210 tabla 10.3)			
Índice de achatamento	< 35 %	< 35 %	< 35 %	< 35 %
Partículas trituradas	100 %	≥ 75 %	≥ 50 %	≥ 75 %
Composição*	ARH ou ARMa	ARH, ARMa ou ARMc	todas	todas
Coeficiente LA	≤ 35 %	≤ 35 %	≤ 40 %	≤ 45 %
Limite líquido	NP	NP	NP	< 25
Plasticidade	NP	NP	NP	< 6
Equivalente de Areia	> 40 %	> 40 %	> 35 %	> 30 %
Coeficiente de limpeza*	< 2 %	< 2 %	< 2 %	n. a.
Fragmentos de argila	< 1 %	< 1 %	< 1 %	n. a.
Matéria orgânica	≤ 0,2 %	≤ 0,2 %	≤ 0,2 %	n. a.
Compostos de enxofre	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solúveis em água	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %

\* Requisito orientativo e não limitador.

Legenda: n. a. – não aplicável; NP – não plástico.

A possibilidade de aplicação dos agregados reciclados tem em conta as propriedades do material para cada classe e a categoria de uso. O Quadro 2.11 apresenta as camadas onde podem ser usados os agregados.

As classes não devem ser um elemento limitador. A qualidade técnica do material, independentemente da sua composição, é o elemento que determina a viabilidade do uso do material nas aplicações identificadas (GERD, 2011).

Quadro 2.11 – Viabilidade de aplicação e categorias de uso para agregados reciclados (GERD, 2011).

Categorias	Classes	Aplicação
Cat 1	ARH	Bases, sub-bases e bermas - tráfego T0
Cat 2	ARH, ARMh e ARMc	Bases, sub-bases e bermas - tráfego T1 e T2
Cat 3	ARH, ARMh, ARMc e ARMa	Bases, sub-bases e bermas - tráfego T3 e T4
Cat 4	ARH, ARMh, ARMc e ARMa	Bases e sub-bases - tráfego inferior a T4

A estrutura de pavimento deve adequar-se, entre outros fatores, à ação prevista do tráfego, nomeadamente dos veículos pesados que se prevê passarem durante a vida útil do pavimento, e fundação.

O guia espanhol GEAR apresenta, para cada categoria a viabilidade de aplicação baseada em classes de tráfego que diferem das classes tidas como referência em Portugal. No Quadro 2.12 pode consultar-se a equivalência das classe de tráfego nos 2 países.

Quadro 2.12 – Classes de tráfego, classificação para tráfego médio diário anual de veículos pesados (TMDA)<sub>p</sub>, em veíc pesados/dia (MOPU, 2003).

TMDA <sub>p</sub>	0	25	50	100	150	200
Portugal	T7 (<50)		T6 (50-150)		T5 (150-300)	
Espanha	T4.2 (<25)	T4.1 (25-49)	T3.2 (50-99)	T3.1 (100-199)		

TMDA <sub>p</sub>	300	500	800	1200	2000	4000
Portugal	T4 (300-500)	T3 (500-800)	T2 (800-1200)	T1 (1200-2000)	T0 (>2000)	
Espanha	T2 (200-799)		T1 (800-1999)		T0 (2000-3999)	

Em Espanha existem 3 classes de fundação, conforme Quadro 2.13, que se determinam pelo módulo de compressibilidade no segundo ciclo de carga ( $E_{v2}$ ), obtido através da norma NLT-357.

Quadro 2.13 – Classes de fundação, Espanha (MOPU, 2003).

Classe de fundação	E1	E2	E3
$E_{v2}$ (MPa)	≥ 60	≥ 120	≥ 300

#### b. Estradas rurais não pavimentadas

Jiménez, et al. (2011) conduziram um estudo que pretendia avaliar o comportamento e impacte ambiental de RCD em condições de obra e identificar as principais diferenças entre o desempenho do agregado reciclado e agregado natural. Para tal, foi construído, em julho de 2007, um trecho experimental de estrada rural não pavimentada em Córdoba, Espanha.

Esta estrada foi construída com 2 secções de 100 m de comprimento e 4,5 m de largura, inclinação longitudinal de 6 % e transversal de 0,5 %. Apresentava uma via para ambos os sentidos de tráfego.

Ambas as secções eram constituídas por sub-base em agregado natural (SG), base em material reciclado misto selecionado (MD-1) e diferiam na camada superficial: a secção 1.1 era constituída por agregado reciclado de betão (RC-1) e a secção 1.2 era constituída por calcário britado (NA-1), como referência, conforme mostra a Figura 2.1.

Os materiais reciclados foram obtidos na demolição de um edifício (MD-1 resulta da estrutura e o RC-1 resulta da fundação) e transformados em central, através de processo de reciclagem.

Foram avaliados os fatores externos, nomeadamente, condições climáticas e tráfego no local.

As informações relativas ao clima foram recolhidas da estação metereológica de Santaella, Córdoba. Mostra que não se registaram temperaturas extremas durante o período 2007-2011,

com valores mínimos no inverno a rondarem os 5° C e valores máximos no Verão perto dos 38° C. A precipitação anual foi superior a 500 mm durante o período em estudo e concentrada no inverno, embora se tenha registado um aumento da precipitação no último ano do estudo, com valor anual superior a 1120 mm.

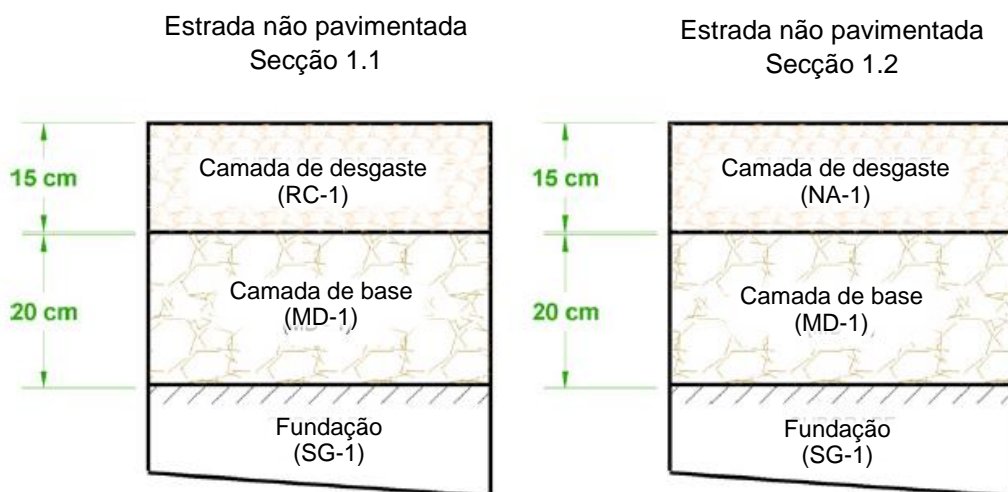


Figura 2.1 – Esquema das secções experimentais da estrada rural não pavimentada (Jiménez, et al., 2012)

As informações de tráfego foram registadas por um equipamento de classificação/contagem de tráfego, que mede o número de veículos em cada sentido e regista a carga por um período de 24h. O tráfego local foi classificado como T4 (corresponde à classe T7 em Portugal), com um  $(TMDA)_p$  inferior a 50 veíc pesados/dia. Concluiu-se, ainda, que a estrada tinha mais tráfego no verão que no inverno.

O Quadro 2.14 mostra a classificação dos materiais quanto à sua composição, conforme a UNE-EN 933-11 (2009).

Quadro 2.14 - Constituição dos RCD do projeto: estrada rural não-pavimentada (Jiménez, et al., 2012) .

Material	R <sub>a</sub>	R <sub>b</sub>	R <sub>c</sub>	R <sub>l</sub>	R <sub>u</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>g</sub>	total
RC-1	0	3,1	76,0	0	20,8	0	0	0,1	100
MD-1	4,4	26,6	34,8	0	33,4	0,2	0,1	0,4	100

Legenda: R<sub>a</sub> (%) – Material betuminoso; R<sub>b</sub> (%) – Elementos de alvenaria de materiais argilosos; R<sub>c</sub> (%) – Betão, produtos de betão e argamassas; R<sub>l</sub> (%) – Partículas leves; R<sub>u</sub> (%) – Agregados não ligados, pedra natural, sem argamassa; X<sub>1</sub> (%) – Solo natural; X<sub>2</sub> (%) – Madeira, vidro, metal e plástico; X<sub>g</sub> (%) – Gesso.

O estudo mostra que ambos os agregados são de boa qualidade e cumpriram todos os limites, à exceção do conteúdo de sal solúvel, o que foi identificado como uma propriedade crítica.

As propriedades estudadas para os materiais utilizados estão presentes no Quadro 2.15 e são descritas seguidamente.

Quadro 2.15 - Propriedades dos materiais: estrada rural não pavimentada (Jiménez, et al., 2012).

Propriedade		Norma	SG-1	MD-1	RC-1	NA-1
Massa volúmica (Mg/m <sup>3</sup> )	0,063/4	UNE-EN 1097-6	-	2154	2138	2399
	4/31,5		-	2116	2243	2590
Absorção de água (%)	0,063/4	UNE-EN 1097-6	-	8,5	8,8	4,7
	4/31,5		-	8,3	6,7	1,6
Equivalente de areia (%)		UNE EN 933-8	-	39	51	41
Resistência à fragmentação, LA		UNE-EN 1097-2	-	36	34	20
Baridade seca máxima PM (Mg/m <sup>3</sup> )		UNE 103501	2,11	1,91	1,88	2,21
Teor óptimo em água PM (%)		UNE 103501	8	12,7	11,16	6,3
CBR (%)		UNE 103502	20	68	138	152
Teor de sulfatos solúveis em água		NP EN 1744-1	< 0,01	0,7	0,3	< 0,01

Legenda: PM, Proctor modificado; Os testes CBR foram realizados com amostras laboratoriais compactadas com condições correspondentes à baridade máxima teórica PM e imersas durante 4 dias.

**Granulometria:** Os materiais RC-1 e NA-1 são bem graduados e o MD-1 é mal graduado. A curva granulométrica dos materiais é contínua, o que indica mais oportunidades de interação entre partículas e habilidade para obter um maior grau de compactação (Jiménez, et al., 2012). A percentagem de finos (< 0,063 mm) é inferior a 10 %.

Conforme a literatura, o agregado reciclado tem uma menor massa volúmica e uma maior absorção de água que o material natural (Padmini, et al., 2009), devido principalmente às partículas de alvenaria e argamassa.

**CBR (*California Bearing Ratio*):** Os materiais utilizados em camadas estruturais apresentam valores elevados de CBR. O material NA-1 tem um valor de CBR mais elevado que o agregado reciclado, e o RC-1 tem um valor mais elevado que o MD-1. Baseada nos maiores valores de CBR dos materiais reciclados e na ausência de dilatação, é esperado que as camadas de base e desgaste tenham uma capacidade de suporte elevada e estabilidade estrutural (Jiménez, et al., 2012).

**Compactação:** Embora os valores de compactação relativa não cumprissem as especificações na camada de topo (98%), o trabalho de compactação foi considerado aceitável. O valor do teor em água na compactação foi inferior ao valor do teor óptimo obtido em laboratório, possivelmente devido às condições climáticas de julho caracterizadas por altas temperaturas e evaporação (Jiménez, et al., 2012).

**Baridade seca:** Tal como nos ensaios laboratoriais, a baridade seca do agregado reciclado compactado no local foi inferior à do agregado natural. A média de valores da baridade seca medida em setembro de 2010 foi estatisticamente diferente dos valores anteriores; este resultado mostra que o agregado reciclado de betão compactado teve um aumento de 4 % depois de 3 anos com tráfego de veículos. Relativamente ao agregado de calcário não existiu qualquer diferença a apontar.

**FWD (*Falling Weight Deflectometer*):** As deflexões da superfície, medidas com o deflectómetro de impacto foram ligeiramente mais altas na secção 1.1, com o agregado reciclado de betão, que na secção construída com calcário britado.

Ensaio de carga com placa: Os módulos de  $E_{v1}$  e  $E_{v2}$  foram calculados com base em dados provenientes do ensaio de carga estática. A sub-base registou uma elevada capacidade de suporte, o valor de  $E_{v2}$  oscilou entre 312 e 453 MPa. A primeira camada construída, MD-1, manteve valores elevados de  $E_{v2}$ , oscilou entre 270 e 405 MPa. A capacidade de suporte de RC-1 e NA-1 não registou diferenças significativas mas ambos os materiais mostraram valores elevados de  $E_{v2}$ , a variar entre 321 e 642 MPa na secção 1.1 (RC-1) e entre 370 e 421 MPa na secção 1.2 (NA-1). Esta variação prende-se com a forma da medição e com as características dos materiais que não são homogéneos nem isotrópicos (Jiménez, et al., 2012). Concluiu-se ainda que o  $E_{v2}$  esteve acima dos limites especificados em Espanha, indicando que a capacidade de suporte dos trechos experimentais foi excelente.

Não se registou aumento da capacidade de suporte devido à atividade pozolânica ou propriedades hidráulicas do cimento ou do agregado reciclado de betão conforme indicado na literatura (Arm, 2001).

Irregularidade (IRI - International Roughness Index): A secção 1.1, construída usando o RC-1 na camada à superfície, teve um comportamento melhor ( $5,394 < IRI < 7,336$ ) que a secção 1.2, com AN-1 ( $5,835 < IRI < 11,597$ ). A secção 1.2 deteriorou-se mais depressa. O estudo relaciona esta deterioração com a modificação da curva de distribuição do tamanho das partículas que ocorreu durante o processo de compactação do agregado reciclado e que resultou num aumento da percentagem de partículas finas. Na secção 1.2 foram observadas diferenças estatísticas significativas após o 1º ano de abertura ao tráfego.

## 2.3 Projeto SUPREMA

O projeto “SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias” foi financiado pelo programa de investigação e desenvolvimento nacional (PTDC/ECM/100931/2008) da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) do Ministério da Educação e Ciência. Este projeto decorreu de 2010 a 2014 e foi desenvolvido por uma equipa de investigação constituída por membros do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e do Instituto Superior Técnico (IST).

Este projeto teve como objetivo estudar a aplicação sustentável de materiais provenientes de RCD em infraestruturas rodoviárias, através da viabilização da sua utilização em camadas granulares não ligadas de base e de sub-base e de leito do pavimento e desenvolveu-se segundo as seguintes linhas de investigação (Freire, et al., 2013b):

- avaliação das características geomecânicas e geoambientais de diferentes tipos de RCD, função da origem, metodologia de triagem e composição final;
- análise do comportamento de RCD enquanto materiais granulares não ligados e sua comparação com os materiais naturais;
- determinação dos parâmetros a utilizar no dimensionamento de pavimentos, considerando a aplicação de RCD;
- estudo dos aspetos construtivos a desenvolver e aplicar, função do tipo de RCD, para a utilização destes materiais em camadas não ligadas de base e de sub-base e de leito do pavimento.

O projeto foi estruturado segundo linhas de ação (tarefas) e prazos associados bem definidos. A dissertação aqui apresentada apoiou-se nas tarefas 2 e 3 do projeto “estudo laboratorial dos materiais” (já realizado ao longo do decorrer do projeto) e propõe-se a responder às tarefas 5 e 6: “análise comparativa do comportamento dos RCD escolhidos e desenvolvimento de



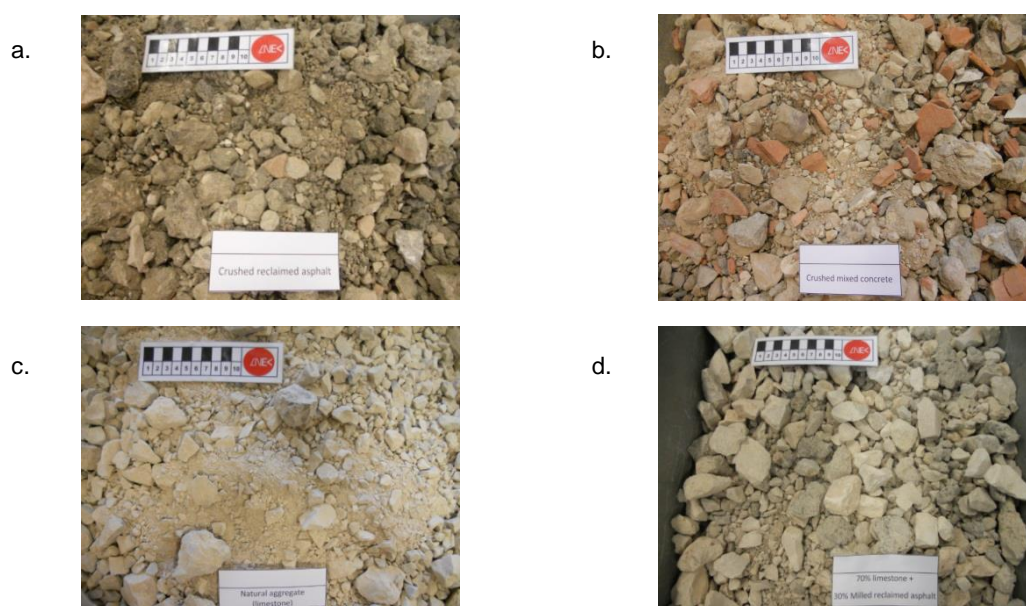
recomendações que contribuam para as melhores práticas na construção das obras rodoviárias com estes materiais” (Freire, et al., 2013b).

Para o projeto foram selecionados 3 agregados reciclados cujas propriedades e desempenho em camadas não ligadas de pavimento são pouco conhecidos: MBB, BBM e MBF. Este último foi misturado com um agregado natural (ABGE) dando origem ao material COMP. Pretendeu-se avaliar a viabilidade técnica da sua aplicação em camadas granulares não ligadas de pavimentos (Freire, et al., 2012). Os agregados utilizados no projeto SUPREMA estão descritos no Quadro 2.16.

Quadro 2.16 – Agregados utilizados no projeto SUPREMA (Simões, 2013).

Sigla	Material	Descrição
MBB	Mistura betuminosa britada	Agregado reciclado constituído por resíduos asfálticos provenientes da britagem de misturas betuminosas, recuperados de pavimentos por fresagem (Fig. 2.2 a)
BBM (50% de BB + 50% de BBM)	Betão britado misto	Agregado reciclado constituído por resíduos mistos provenientes da britagem de alvenaria e betão (Fig. 2.2 b)
ABGE	Agregado britado de granulometria extensa	Agregado natural britado de natureza calcária e de granulometria extensa (Fig. 2.2 c)
COMP (70% ABGE + 30% MBF)	Mistura composta por 70% de ABGE com 30% de mistura betuminosa fresada	Agregado reciclado constituído por resíduos asfálticos provenientes de misturas betuminosas, recuperados por fresagem, e misturados com ABGE calcário (Fig. 2.2 d)

Estes materiais agregam diferentes componentes, resultado da reciclagem de resíduos mistos, conforme se pode observar na Figura 2.2.



Legenda: a. MBB; b. BBM; c. ABGE; d. COMP.

Figura 2.2 – Fotografia dos materiais utilizados no projeto SUPREMA (Freire, et al., 2012).

No projeto SUPREMA começou-se por efetuar a caracterização dos materiais (RCD) quanto à sua constituição, conforme se pode observar no Quadro 2.17, e propriedades geométricas, químicas e de comportamento mecânico, conforme Quadro 2.18. Com estes valores foi possível classificar cada um dos resíduos e conhecer a viabilidade da sua aplicação em obras rodoviárias conforme especificação LNEC E 473 (desenvolvido no âmbito desta dissertação e apresentado em capítulo posterior).

Quadro 2.17 - Constituição dos RCD estudados no projeto SUPREMA.

Material	R <sub>c</sub>	R <sub>u</sub>	R <sub>g</sub>	R <sub>c</sub> +R <sub>u</sub> +R <sub>g</sub>	R <sub>b</sub>	R <sub>a</sub>	FL	X
MBB	19	10	0	29	1,8	69,1	0,1	0
BBM	67,55	16,5	0,25	84,3	13,15	1,85	0,6	0,1
COMP	0,03	75,1	0	75,13	0	24,87	0	0

Legenda: R<sub>a</sub> (%) – Material betuminoso; R<sub>b</sub> (%) – Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante; R<sub>c</sub> (%) – Betão, produtos de betão e argamassas; R<sub>g</sub> (%) – Vidro; R<sub>u</sub> (%) – Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos; X (%) – Madeira, metal ferroso e não ferroso, borracha, gesso, partículas de argila e solo; FL (cm<sup>3</sup>/kg) – Volume de material flutuante.

Quadro 2.18 - Propriedades dos materiais estudados no projeto SUPREMA.

Propriedade	Norma	MBB	BBM	COMP
Dimensão máxima (mm)	NP EN 933-1	31,5	40	31,5
Teor de finos (passado no # 0,063 mm, %)	NP EN 933-1	3	3,5	5,7
Sobretamanho	NP EN 933-1+A1	OC80	OC90	OC90
Teor em finos (máx./mín.)	NP EN 933-1+A1	UF3/LF2	UF5/LF2	UF7/LF4
Classe granulométrica	NP EN 933-1+A1	GA	GC	GP
Equivalente de areia (%)	NP EN 933-8	84	92	47
Azul de metileno, MB (g/kg)	NP EN 933-9	0,7	2,2	3,7
Resistência à fragmentação, LA	NP EN 1097-2	25	38	27
Resistência ao desgaste, MDE (%)	NP EN 1097-1	18	36	18
Teor de sulfatos solúveis em água	NP EN 1744-1	0,01	0,08	0,01

Para a caracterização dos materiais reciclados em obra, foram construídos quatro trechos experimentais num parque industrial localizado no Seixal. O pavimento, com extensão de aproximadamente 90 m e uma largura de 5,5 m em perfil transversal na faixa de rodagem, era constituído por camada de mistura betuminosa em macadame betuminoso do tipo AC 20 bin 50/70, com espessura média de 0,07 m e por camada de sub-base em material granular, com espessura média de 0,34 m. A constituição do material granular, aplicado em camada de sub-base, variava de acordo com o trecho experimental. Os materiais utilizados em cada trecho, para camada de sub-base, foram os materiais RCD e o agregado natural de referência: T1 – MBB; T2 – BBM; T3 – ABGE; e T4 – COMP.

Na Figura 2.3 pode observar-se a planta esquemática dos diferentes trechos, bem como a posição da instrumentação (instrumentos identificados com a cor verde).



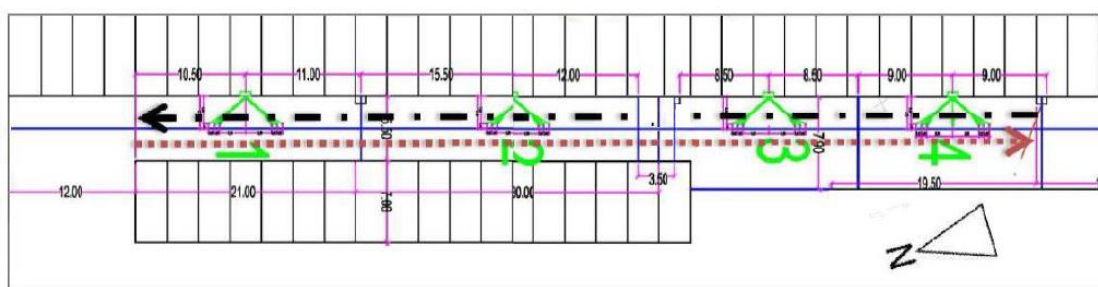


Figura 2.3 – Planta esquemática dos trechos experimentais (Simões, 2013).

A construção do pavimento rodoviário consistiu nas seguintes fases (Simões, 2013):

- deposição dos materiais a aplicar nas camadas granulares;
- operações de espalhamento dos materiais granulares;
- rega da camada granular;
- compactação das camadas granulares com recurso a cilindro vibrador de rasto liso;
- compactação das camadas betuminosas utilizando rolo compactador de pneus e cilindro duplo com vibração.

Durante a construção procedeu-se ainda à instrumentação dos diferentes trechos experimentais, com: extensómetros verticais, no topo do aterro de fundação do pavimentos; células de carga, no topo do aterro de fundação; e extensómetros horizontais, na base da camada betuminosa (Simões, 2013).

Foram efetuadas 10 campanhas de avaliação da capacidade de carga com ensaios de deflectómetro de impacto (FWD), entre 17/07/2012 e 24/04/2013, as primeiras quatro ainda em fase de construção do pavimento rodoviário.

Estes ensaios permitiram avaliar os módulos de deformabilidade das diferentes camadas e da fundação, conforme se pode observar no Quadro 2.19, para a campanha 10 e obtidos de Simões (2013). A escolha da campanha prendeu-se com o facto desta estar mais afastada do período de construção e ser considerada a mais condicionante uma vez que decorre a seguir ao inverno. A relação entre estas camadas surge como essencial para a estimativa dos módulos de deformabilidade das camadas das estruturas de pavimento e consequente análise (desenvolvida no âmbito desta dissertação e apresentada em capítulo posterior).

Quadro 2.19 – Módulos de deformabilidade das camadas granulares e de fundação, da campanha 10 do projeto SUPREMA.

Mód. Deformabilidade (MPa)		MBB	BBM	ABGE	COMP
Campanha 10 (04/2013)	Camada granular ( $E_g$ )	206	285	253	338
	Fundação ( $E_f$ )	117	164	156	137
	Relação ( $E_g/E_f$ )	1,76	1,74	1,62	2,47

Os ensaios de carga realizados nos trechos experimentais nas várias campanhas mobilizaram naturalmente a globalidade das estruturas de pavimento, incluindo a fundação. Simões (2013) analisou os resultados dos ensaios de forma a evidenciar o comportamento dos RCD em

relação à camada betuminosa e ao solo de fundação. No caso da camada betuminosa, para além dos resultados dos ensaios de carga corrigidos para a temperatura de ensaio, foram ainda realizados ensaios de tração indireta em compressão diametral com base na norma EN 12697-26.

## 3 Dimensionamento de pavimentos segundo a AASHTO

### 3.1 Manual de dimensionamento (MEPDG)

O MEPDG representa uma grande alteração na história do projeto rodoviário. É um processo de estudo que dura desde há algum tempo e tem sofrido uma grande evolução ao longo dos últimos anos.

Desde a sua implementação os Manuais da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) tiveram um papel muito importante no dimensionamento de pavimentos. Estes baseavam-se em equações de desempenho empíricas e limitadas às condições para as quais foram estabelecidas. Quando o Manual da AASHTO de 1986 foi adotado surgiu a necessidade de incorporar um método mecanicista. Para o desenvolver, juntaram-se três organizações: AASHTO, NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) e FHWA (Federal Highway Administration), e criou-se o Projeto NCHRP 1-37A – *Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*.

O objetivo deste projeto numa primeira fase foi desenvolver um manual (2002) tanto para pavimentos novos como para o caso da reabilitação de pavimentos. Numa segunda fase, tinha-se como objetivo recolher dados que refletissem o estado corrente dos projetos rodoviários e desenvolver um manual que utilizasse modelos mecanicistas; esperava-se que este manual servisse de base a todos os projetos de pavimentos novos, beneficiados e reabilitados.

O MEPDG ficou completo em 2004 e foi divulgado para revisão e alterações importantes. Foi realizada também uma revisão formal da NCHRP, através do projeto 1-40A, que resultou em várias melhorias, muitas das quais incluídas no projeto 1-40D, que viria a ser a versão 1.0 da aplicação MEPDG e respetivo manual. A versão 1.0 foi submetida em Abril de 2007 à NCHRP, FHWA e AASHTO para se tornar padrão provisório da AASHTO.

A versão 2.1 é, para já, a atualização mais recente do ME Design e foi lançada em 31 de julho de 2014. Várias agências nos E.U.A., quer estaduais quer outras agências interessadas, começaram a implementar o MEPDG, a formar colaboradores, a recolher dados de *input*, a obter equipamentos de testes para calibrações locais e a partilhar conhecimento.

O objetivo do MEPDG é permitir aos engenheiros rodoviários utilizar uma ferramenta de projeto e análise de pavimentos novos e reabilitados, baseada nos princípios empírico-mecanicistas. Estes princípios conduzem a um processo lógico de projeto, assente em 3 elementos básicos (AASHTO, 2008):

1. a teoria usada para prever respostas críticas do pavimento (tensões, extensões, deflexões, etc), que são função do tráfego e do clima;
2. os procedimentos de caracterização de materiais que suportem e sejam consistentes com o projeto;
3. a relação entre os parâmetros de resposta crítica do pavimento e as extensões observadas no terreno.

O Quadro 3.1 apresenta uma análise sucinta aos dois manuais usados nos E.U.A. e justifica o esforço e rápida implementação do MEPDG nos E.U.A..

Quadro 3.1 – Comparação dos manuais AASHTO e MEPDG (UW, acessado em Outubro de 2014).

Manual de Projeto AASHTO	MEPDG
Metodologia empírica	Metodologia empírica e mecanicista
Contém 5 <i>inputs</i> para pavimentos flexíveis e 10 <i>inputs</i> para pavimentos rígidos, apenas 1 tipo de clima	Mais de 100 <i>inputs</i> na totalidade, 35 ou mais para pavimentos flexíveis e 25 ou mais para pavimento rígido, mais de 800 tipos de clima
Depende da extrapolação de relações empíricas	Não está dependente da extrapolação de relações empíricas
Utiliza cargas de eixo e configurações de eixo idênticas	Utiliza tráfego misto
Dá origem a projetos conservativos que não otimizam os custos efetivos	-
Não trabalha adequadamente com reabilitação	-
Não consegue considerar de forma adequada as características de projeto, materiais e cargas modernas	Utiliza condições de clima locais e propriedades específicas do material
-	Foram publicadas imposições legais para o uso deste método

## 3.2 Aplicação AASHTOWare® pavement design (DARWin-ME)

### 3.2.1 Estrutura

O MEPDG usa um *software user-friendly* que integra uma análise para prever o comportamento do pavimento ao longo do período de dimensionamento. A análise da estrutura de pavimento é realizada com uma interação dos dados de tráfego, clima e materiais. Ao usar o MEPDG atinge-se o seu objetivo principal: uma previsão da evolução do pavimento ao longo dos anos e, conseqüentemente, seu dimensionamento através da avaliação do seu desempenho (Rabab'ah & Liang, 2008).

A Figura 3.1 apresenta os grupos de dados de entrada e saída da aplicação. As setas indicam que este é um processo um dinâmico. O processo inicia-se com um estrutura inicial e, após diferentes iterações, termina com uma deflexão prevista que cumpre os requisitos baseados no nível desejado de confiança definido pelo utilizador (Daniel & Chehab, 2008).

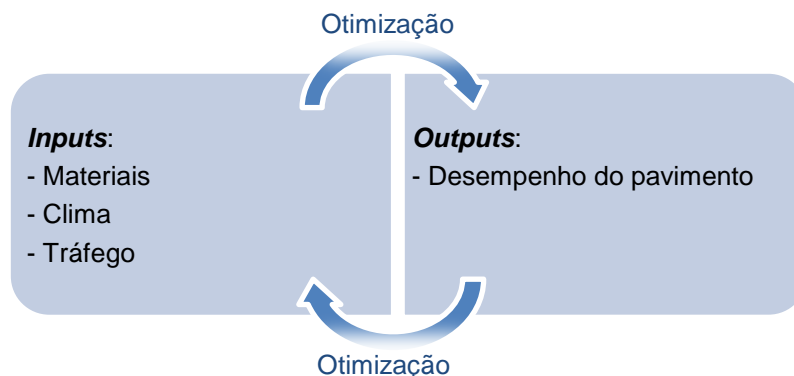
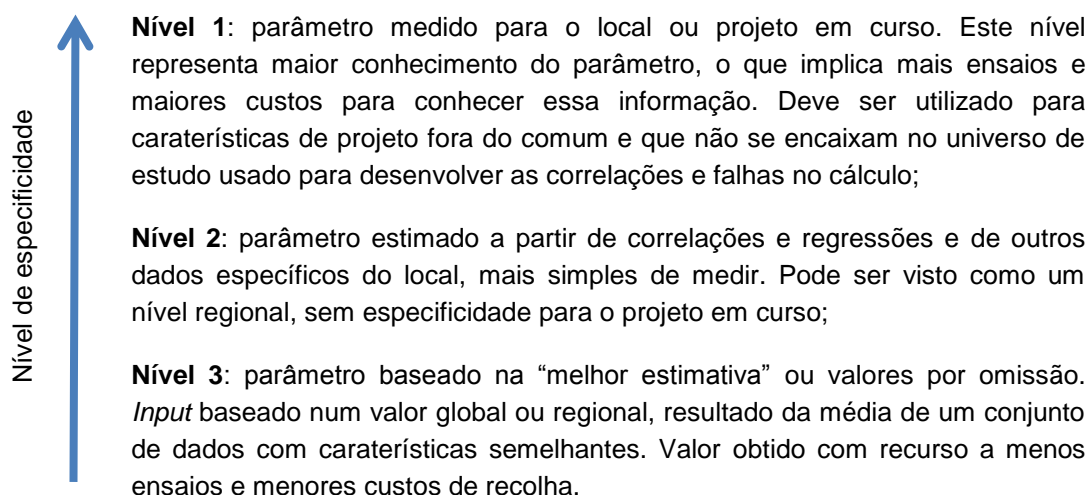


Figura 3.1 – Conjunto de dados de *input* e *output* do MEPDG.

Os *inputs* do DARWin-ME podem ser de 3 níveis (AASHTO, 2008):



Num mesmo projeto podem ser utilizados diferentes níveis de *input*, consoante os parâmetros.

### 3.2.2 Materiais

Conforme referido anteriormente, o MEPDG recorre a três grupos de dados essenciais para o cálculo de extensões e avaliação do desempenho do pavimento: materiais, tráfego e clima.

Por omissão, a janela base da aplicação solicita não só informações gerais do projeto, nomeadamente tipo de projeto e pavimento, duração da obra e datas-chave, mas também dados relativos aos materiais utilizados nas camadas granulares e betuminosas.

Na Figura 3.2 pode observar-se a área da aplicação DARWin-ME onde são inseridos os dados dos materiais. No Anexo I são apresentados estes *inputs*, em detalhe, acompanhados de uma breve descrição.

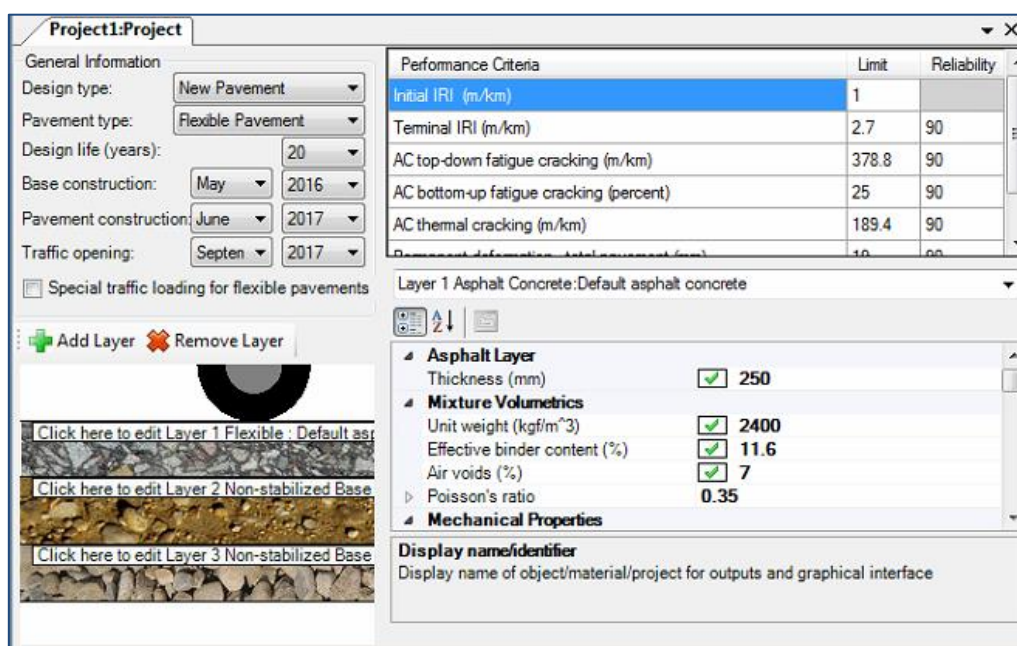


Figura 3.2 – *Printscreen* da janela de introdução das características dos materiais.

O preenchimento dos parâmetros de *input* pode ser realizado com recurso a bases de dados próprias, pertencentes às empresas, ou bases de dados globais como, por exemplo, o projeto de desempenho de pavimentos a longo prazo, “Long-Term Pavement Performance” (LTPP), que é um projeto de 20 anos para estudar os pavimentos em serviço nos E.U.A. gerido pela FHWA. Este projeto também forneceu os dados para a calibração do MEPDG. Naturalmente que os valores das características dos materiais devem transparecer os valores reais verificados em obra, para que a previsão da evolução de desempenho do pavimento seja a mais realista ao longo dos anos de serviço do pavimento.

O valor dos parâmetros que caracterizam um projeto têm uma relação causa-efeito quer com o cálculo de outras variáveis quer com os resultados, que serão sempre afetados em última análise. Alguns autores mostram estas relações, de entre os quais: Flintsch et al (2008) concluíram que a equação de previsão do módulo dinâmico quando se opta pelo nível 2 de *input* estima razoavelmente o módulo dinâmico medido; e Graves e Mahboub (2006) usaram uma amostra global para avaliar a sensibilidade do MEPDG à alteração das variáveis e concluíram que o tipo de ligante (parâmetro de penetração, entre outros) era significativo para o cálculo de deformação total e das camadas betuminosas, para um nível de confiança de 95%.

### 3.2.3 Tráfego

O MEPDG considera o tráfego de veículos pesados através do conhecimento do espectro de cargas associado às várias classes e sub-classes de veículos.

Na Figura 3.3 pode observar-se a área da aplicação DARWin-ME onde são inseridos os dados relativos ao tráfego. No Anexo II estão enunciados estes *inputs*, em detalhe, acompanhados de uma breve descrição.

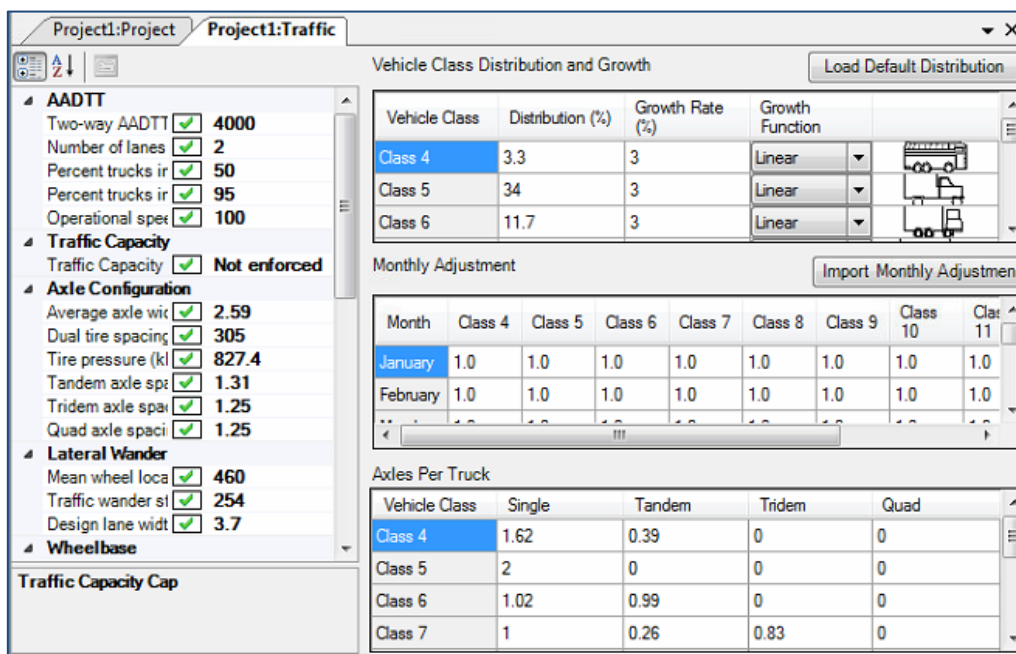


Figura 3.3 – Printscreen da janela de introdução dos dados de tráfego.

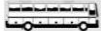
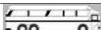











Nos E.U.A. as classes e subclasses de veículos pesados são regulamentadas pela Federal Highway Administration (FHWA), que faz parte do United States Department of Transportation



(DOT). Esta instituição tem definido um conjunto de regras e regulamentos comuns a todos os estados, que fornecem suporte técnico e financeiro para a construção, conservação e reabilitação da rede de estradas e auto-estradas (Cordeiro, 2010).

Em Portugal a classificação dos veículos adotada é a da EP (Estradas de Portugal). Estas duas classificações (E.U.A. e Portugal) são diferentes pelo que é necessário fazer corresponder cada classe e subclasse para que se possa preencher a aplicação DARWin-ME com dados extraídos das bases de dados de Portugal, conforme apresentado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Correspondência entre classes e subclasses segundo os organismos rodoviários de Portugal e E.U.A. (Cordeiro, 2010).

FHWA	Estradas de Portugal (EP)			
Classe	Classe	Subclasse	Descrição	Figura
Classe 4	Classe I	I1	Autocarros com 2 eixos	
		I2	Autocarros com 3 eixos	
		I3	Outros autocarros com mais eixos	-
Classe 5	Classe F	F1	Veículos pesados com 2 eixos e sem reboque	
Classe 6	Classe F	F2	Veículos pesados com 3 eixos, 1 à frente e 2 atrás, e sem reboque	
		F3	Veículos pesados com 3 eixos, 2 à frente e 1 atrás, e sem reboque	
Classe 7	Classe F	F4	Veículos pesados com 4 eixos, 2 à frente e 2 atrás, e sem reboque	
		F5	Outros camiões sem reboque	-
Classe 8	Classe G	G1	Camiões com 2 eixos e com reboque de 2 eixos	
	Classe H	H1	Tratores com 2 eixos e semi-reboques de 1 eixo	
		H2	Tratores com 3 eixos e semi-reboques de 1 eixo	
Classe 9	Classe G	G2	Camiões com 2 eixos e com reboque de 3 eixos	
		G3	Camiões com 3 eixos e com reboque de 2 eixos	
	Classe H	H4	Tratores com 3 eixos e semi-reboques de 2 eixos	
		H5	Tratores com 2 eixos e semi-reboques de 3 eixos	
	Classe 10	Classe H	H6	Tratores com 3 eixos e semi-reboques de 3 eixos
Classes 11, 12 e 13	Classe G	G4	Outros camiões com reboque	-
	Classe H	H7	Outros tratores com semi- reboque e/ou reboque	-

O tráfego tem influência na avaliação da evolução do desempenho do pavimento. Uma revisão bibliográfica desta influência mostra que:

- a previsão de deformação é mais sensível ao ajustamento mensal de tráfego enquanto que o fendilhamento do tipo pele de crocodilo é mais sensível à distribuição horário do tráfego. O fendilhamento longitudinal é sensível a ambos os parâmetros. A previsão de IRI (*International Roughness Index*) é insensível aos *inputs* de tráfego (medidos) comparando com os valores que acompanham a aplicação por omissão (CAIT, 2006);
- Ceylan mostrou que o fendilhamento longitudinal é sensível à distribuição do tráfego pesado, enquanto que a pele de crocodilo e o IRI não são (Ceylan, et al., 2009);
- no Canadá, comparou-se o MEPDG com os outros métodos de avaliação da deflexão de superfície e o método da AASHTO 1993 e concluiu-se que o MEPDG apresenta valores de deformação semelhantes, estima-os por defeito quando o volume de tráfego é baixo mas estima por excesso as estruturas quando o volume de tráfego pesado é médio a alto (Ahammed, et al., 2011).

#### a. Agressividade de tráfego

O fator de agressividade de tráfego é adotado para traduzir o efeito de um dado número acumulado de passagens de veículos pesados com características muito diversas, fazendo a conversão em passagens equivalentes de um eixo padrão

Este fator reduz a um valor único a agressividade dos diferentes veículos pesados que circulam numa determinada via e que instalam estados de tensão e de deformação muito variados. Pode ser calculado conforme apresentado na equação 3.1.

$$\alpha = \frac{N_{80}}{NAV P} \quad (3.1)$$

onde,

$\alpha$	Fator de agressividade
$N_{80}$	Número acumulado de passagens do eixo padrão de 80 kN
$NAV P$	Número acumulado de veículos pesados

A dificuldade em traduzir a agressividade do tráfego conduziu à realização de um estudo à escala real, nos anos 50 do séc. XX, designado ensaio AASHO (American Association of States Highways Officials). Este ensaio permitiu concluir que existe uma relação entre efeitos de diferentes cargas, conforme a equação 3.2.

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^x = f \quad (3.2)$$

onde,

$N_1$	Número de passagens de um eixo simples de carga $P_1$ que provoca um dano análogo no pavimento ao de $N_2$ passagens de um eixo simples de carga $P_2$
$N_2$	Número de passagens de um eixo simples de carga $P_2$
$f$	Coefficiente de equivalência

Neste ensaio, deduziu-se que o valor do expoente é de, aproximadamente, 4.

Os eixos duplos e triplos devem ser transformados em eixos simples. Devido à sobreposição do efeito dos rodados, considera-se que o peso  $P_{ta}$  de um eixo duplo corresponde a 1,4 eixos simples de peso  $P_{ta}/2$  e o peso  $P_{tr}$  de um eixo triplo corresponde a 2,3 eixos simples de um peso  $P_{tr}/3$  (Almeida, 2015).



O MACOPAV admite fatores de agressividade médios, resultado da análise de estações de pesagem nas quais a ocorrência de eixos sobrecarregados foram tidas em consideração. Para uma classe de tráfego T6 e eixo padrão de 80 kN admite-se um fator de agressividade de 2. Para a classe de tráfego T7 o MACOPAV aconselha a realização de um estudo específico.

A aplicação DARWin-ME considera vários *inputs* de tráfego que contribuem para o cálculo do fator de agressividade de tráfego:

- distribuição da carga nos eixos (ALF), nomeadamente para eixo simples, duplo, triplo e quádruplo;
- número de tipo de eixos por classe de veículo (NAT);
- distribuição de volume de veículos (VCD), relativa ao TMDA<sub>p</sub> pelos 10 tipos de classes;
- fator de distribuição horária (THDF) e distribuição mensal (MAF);

A distribuição de carga nos eixos (ALF) concentra uma quantidade elevada de informação. Existem 39 grupos de carga para veículos com configuração de eixo simples, que vão desde 3.000 lbs (pounds) a 41.000 lbs, em incrementos de 1.000 lbs. Os veículos com eixo duplo são classificados por grupos de carga entre 6.000 lbs e 82.000 lbs, com incremento de 2.000 lbs. Para veículos com eixo triplo ou quádruplo o intervalo de classificação de carga começa em 12.000 lbs e termina em 102.000 lbs, com incrementos de 3.000 lbs.

O Quadro 3.3 mostra a distribuição de carga num eixo simples, dados preenchidos por omissão na aplicação DARWin-ME, sendo que as unidades apresentadas são as praticadas nos E.U.A. (conversão de unidades: 1 lbs = 0,45 kg). A distribuição, em percentagem, está organizada por mês e classe de veículo e soma um total de 100 % por linha.

Quadro 3.3 – Distribuição de carga nos eixos (ALF): aplicação DARWin-ME. Exemplo de eixo simples.

Mês	Classe de veículo	Carga nos eixos (x 10 <sup>3</sup> lbs)							
		3	4	5	6	7	...	41	Σ
Janeiro	CL4	1,80	0,96	2,91	3,99	6,8	...	0	100
Janeiro	CL5	10,05	13,21	16,42	10,61	9,22	...	0	100
Janeiro	CL6	2,47	1,78	3,45	3,95	6,70	...	0	100
Janeiro	CL7	2,14	0,55	2,42	2,70	3,21	...	0	100
Janeiro	CL8	11,65	5,37	7,84	6,99	7,99	...	0	100
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Dezembro	CL13	8,88	2,67	3,81	5,23	6,03	...	0	100

O número de tipo de eixos por veículo (NAT) é a média do número de eixos individuais para cada classe de veículo e para cada tipo de eixo (simples, duplo e triplo). Pode ser calculado pela divisão do número total de um tipo de eixo específico medido para uma classe de veículo pelo número total de veículos naquela classe. O Quadro 3.4 apresenta os valores por omissão que foram estimados com base nos dados de tráfego do LTPP.

A distribuição normalizada de volume de veículos (VCD) resulta da análise de dados dos E.U.A., recolhidos por diversos anos. Representa a percentagem de cada classe de veículos dentro de uma distribuição de tráfego e está organizada em função do índice TTC (Truck Traffic Classification), conforme exemplo do Quadro 3.5. Este índice é usado para selecionar a distribuição que melhor se adequa ao projeto em estudo. Estão disponíveis 17 grupos TTC.

Quadro 3.4 – Número de tipo de eixos por veículos (NAT): aplicação DARWin-ME.

Tipo de eixo	Classe de veículo									
	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8	CL9	CL10	CL11	CL12	CL13
simples	1,62	2	1,02	1	2,38	1,13	1,19	1,62	3,52	2,15
duplo	0,39	0	0,99	0,26	0,67	1,93	1,09	0,39	1,14	2,13
triplo	0	0	0	0,83	0	0	0,89	0	0,06	0,35

Quadro 3.5 – Volume de veículos (VCD): aplicação DARWin-ME. Exemplo para TTC 12 e 14.

TTC	Classe de veículo										Σ
	CL4	CL5	CL6	CL7	CL8	CL9	CL10	CL11	CL12	CL13	
12	3,9	40,8	11,7	1,5	12,2	25	2,7	0,6	0,3	1,3	100
14	2,9	56,9	10,4	3,7	9,2	15,3	0,6	0,3	0,4	0,3	100

O fator de distribuição horária de veículos pesados (THDF) é usado para distribuir o tráfego total num dia típico, apresenta-se em percentagem e tem 24 entradas. Este fator é apenas necessário para a análise de pavimentos rígidos pois relaciona o volume horário de veículos pesados com os gradientes térmicos nas placas de pavimento rígido.

O fator de ajuste mensal (MAF) reflete os padrões de circulação de tráfego durante 1 ano. A aplicação considera valores de 1 para todos os meses porque a calibração foi realizada para artérias principais e estradas interestaduais com alterações sazonais pouco significativas.

Os fatores de distribuição horária e ajuste mensal não foram considerados nos cálculos uma vez que a distribuição é equitativa e não acrescentam valor ao estudo.

O cálculo do fator de agressividade conta, para além dos dados de *input* indicados, com uma relação de equivalência entre o efeito das diferentes cargas no pavimento. O modelo utilizado relaciona conceitos de EALF e ESAL, explicados abaixo.

Os fatores de equivalência de carga num eixo (EALF) representam a relação entre o dano causado pela carga e configuração do eixo em relação ao dano causado pela passagem da carga e eixo *standard*. Considera-se, para este caso, carga *standard* de 18-kip (80,068 kN) em eixo simples.

$$EALF = \log \frac{w_{tx}}{w_{t18}} \quad (3.3)$$

onde,

$w_{tx}$  Número de aplicações de carga no eixo no fim do período t

$w_{t18}$  Número de aplicações de carga 18-kip em eixo simples no fim do período t

Para determinar a estrutura de pavimento num projeto deve ter-se em consideração a estimativa de ESALs (equivalent simple axle load) do pavimento durante o período para o qual está a ser projetado.

$$ESAL = \sum_i F_i n_i \quad (3.4)$$

onde,

$F_i$  Fator equivalente de carga no eixo (EALF) para cada grupo de carga no eixo  
 $n_i$  Número de passagens de cada grupo de carga no eixo durante o período de projeto

Os fatores de equivalência de eixo usados para converter eixos simples, duplos e triplos em ESALs estão presentes no apêndice do guia de pavimentos da AASHTO (AASHTO, 1993). O fator de equivalência, para pavimentos flexíveis, depende não só do tipo de eixo mas da magnitude de carga no eixo, do número estrutural (SN) e do índice de serviço do pavimento ( $p_t$ ).

Para conhecer os ESALs é necessário assumir um número estrutural para pavimentos flexíveis. O uso de SN = 5 para a determinação de fatores de equivalência de eixos simples de 18-kip dão resultados suficientemente adequados para projeto (AASHTO, 1993). Em caso de desadequação, esta assunção resulta normalmente em sobreestimativa de eixos simples equivalentes 18-kip (AASHTO, 1993).

O Quadro 3.6 apresenta os fatores de equivalência para um eixo simple de 18-kip, com número estrutural de 5 e índice de serviço de pavimento de 2,5, valores usados por omissão.

Quadro 3.6 – Fatores de equivalência para eixo simples de 18-kip (adaptado de AASHTO, 1993).

Carga		$p_t = 2,5$ e $SN = 5$		
kips	Pound-force	Eixo simples	Eixo duplo	Eixo triplo
2	2.000	0,0002	0	0
4	4.000	0,002	0,0003	0,0001
6	6.000	0,01	0,001	0,0003
8	8.000	0,034	0,003	0,001
10	10.000	0,088	0,007	0,002
...	...	...	...	...
90	90.000	-	46,8	11,6

O quadro de fatores de equivalência apresenta um conjunto discreto de dados que pode, através de uma regressão linear, para cada eixo, cobrir o espectro de valores de carga existente na aplicação DARWin-ME.

Cordeiro, 2010, realizou três regressões lineares nas quais relacionou a carga, em kips, com o fator de equivalência de cada eixo (eixo simples, duplo e triplo). Cada uma das equações resultantes apresenta um  $R^2$  de 0,99, o que indica um ajuste elevado aos valores tabelados.

$$\text{Eixo simples} \quad y = (1 \times 10^{-5}) \times x^{3,9491} \quad (3.5)$$

$$\text{Eixo duplo} \quad y = (9 \times 10^{-7}) \times x^{3,9507} \quad (3.6)$$

$$\text{Eixo triplo} \quad y = (2 \times 10^{-7}) \times x^{3,9325} \quad (3.7)$$

onde,

$y$  Fator de equivalência para cada eixo (simples, duplo e triplo)

$x$  Carga (kips)

A agressividade de tráfego foi calculada de acordo com os passos seguintes (no que se segue, considere-se  $i$  o tipo de eixo,  $j$  a classe de veículos e  $k$  o peso no eixo):

1. transformação da unidade da carga para kips;
2. cálculo da equivalência das cargas ( $ESAL_{ik}$ ) no pavimento, por tipo de eixo e peso no eixo;
3. cálculo da agressividade ponderada ( $AG_{ij}$ ), por tipo de eixo e por classe de veículos:

$$AG_{ij} = \sum_k ESAL_{ik} \times ALF_{ikj}(\%) / 100 \quad (3.8)$$

$ALF_{ikj}$ : distribuição da carga nos eixos, por tipo de eixo, classe de veículos e peso no eixo

4. cálculo da agressividade ( $AG_j$ ), por classe de veículos:

$$AG_j = \sum_i AG_{ij} \times NAT_{ij} \quad (3.9)$$

$NAT_{ij}$ : coeficiente de distribuição de carga nos eixos dos veíc. pesados, por tipo de eixo e classe de veículos

5. fator de agressividade por distribuição de tráfego TTC:

$$\alpha = (\sum_j (AG_j \times TMDA_p \times VCD_j)) / TAVP \quad (3.10)$$

$TMDA_p$ : tráfego médio diário anual de veículos pesados

$VCD_j$ : distribuição normalizada de volume de veículos por classe de veículos

$TAVP$ : tráfego acumulado de veículos pesados

O fator de agressividade de tráfego calculado para os diferentes índices TTC mostra que se encontram dentro do intervalo [0,6;1,2]. Os fatores de agressividade para a distribuição 12 e 14 são de 0,7 e 0,6, respetivamente, muito abaixo do valor de referência do MACOPAV para uma classe de tráfego T6 ( $\alpha=2$ ).

### 3.2.4 Condições climáticas

O MEPDG utiliza dados do clima recolhidos de mais de 800 estações metereológicas nos E.U.A.. Estes dados têm origem na análise realizada pelo programa MERRA (*Modern Era-Retrospective Analysis*). Este programa, criado para investigação e aplicação prática, integra vários sistemas de observação com modelos numéricos. Foi desenvolvido pelo Gabinete de Sistemas de Observação da Terra da NASA com dois objetivos principais: colocar as observações do sistema de satélites da NASA num contexto climático e melhorar as observações do ciclo hidrológico face às reanálises anteriores. O MERRA foi criado com a versão 5.2.0 do sistema GEOS e com o sistema DAS e cobre a era moderna, desde 1979 até ao presente (NASA, acedido em Outubro de 2014).

Os dados dos E.U.A. estão disponíveis para *download*. Para os outros países, os dados devem ser extraídos de arquivos do clima e ser transformados em ficheiros “.hcd”. Este tipo de ficheiro pode ser importado pela aplicação.

Após inserção dos dados na aplicação, pode utilizar-se uma (a mais próxima) ou mais estações metereológicas (criando uma estação virtual) para calcular o ciclo de vida do pavimento. O uso

de várias estações diminui a probabilidade de falha, uma vez que os dados de uma dada estação podem estar incompletos ou errados.

Para Portugal, escolheram-se quatro locais representativos do país:

- Beja, local no interior sul;
- Lisboa, capital do país;
- Coimbra, cidade litoral centro;
- Porto, maior aglomerado populacional do norte de Portugal.

No âmbito de uma investigação, o Instituto Superior de Engenharia de Coimbra fez uma recolha exaustiva de dados e, com a colaboração da Universidade de Maryland, transformou-os no ficheiro do tipo *Integrated Climatic Model* (ICM), com extensão “.hcd”.

Um ficheiro do tipo ICM é composto por 25 linhas para cada dia: na 1ª linha é apresentado, pela seguinte ordem, o mês, o dia, o ano, a hora de nascer do sol, a hora de pôr-do-sol e a radiação solar; as 24 linhas seguintes correspondem a cada hora desse mesmo dia, onde são indicadas, pela seguinte ordem, a hora, a temperatura em graus Fahrenheit, a precipitação em polegadas, a velocidade do vento em milhas por hora, nível de céu limpo ou nível de nebulosidade e a profundidade do nível freático em pés (Simões, et al., 2013).

Na Figura 3.4 pode observar-se a área da aplicação DARWin-ME onde são inseridos os dados do clima.

No Anexo III estão enunciados estes *inputs*, em detalhe, acompanhados de uma breve descrição.

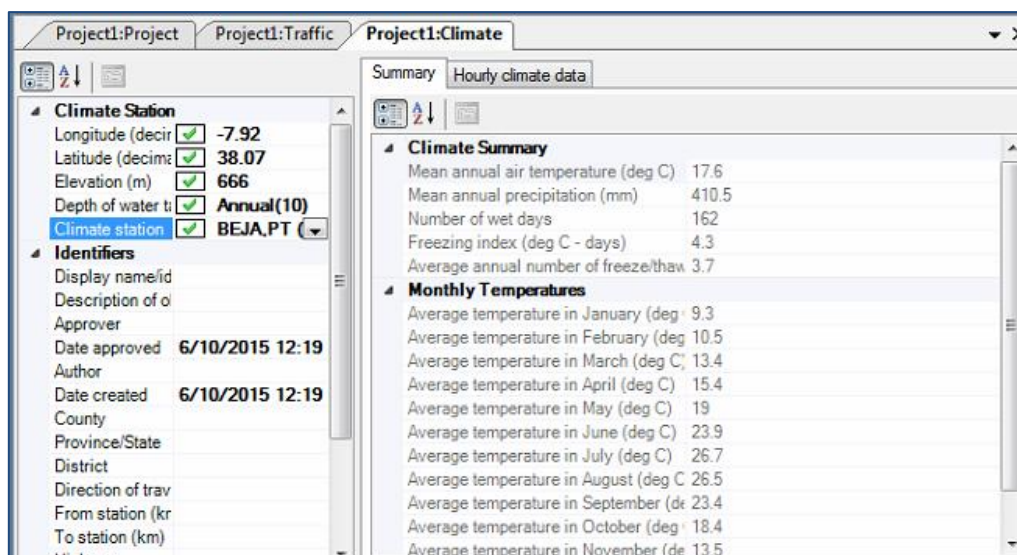


Figura 3.4 – Printscreen da janela de introdução dos dados de clima.

A análise é baseada na acumulação de degradação em função do tempo e tráfego pesado. O intervalo de análise é 1 mês, à exceção do período no qual possa ocorrer gelo e degelo (período mais frio do ano e que pode influenciar a resposta das camadas do pavimento). Nestas condições pode existir alteração acelerada do módulo de deformação das camadas não-ligadas, pelo que o intervalo passa a quinzenal.

Para análise do comportamento das camadas constituintes do pavimento em estudo, o MEPDG divide o projeto em sub-camadas, de acordo com critérios pré-definidos que se prendem com o tipo de material, a espessura e profundidades, entre outras. Calcula as respostas críticas em cada sub-camada usando a teoria da elasticidade, através de um *software* denominado JULEA, já incorporado no MEPDG.

Usa também uma outra aplicação, designada modelo de clima integrado (ICM), que calcula as condições de temperatura e humidade no pavimento de hora a hora (Larson & Dempsey, 1997). Com estes dados o MEPDG estima o *creep compliance* e a força de tração indireta, calcula as forças de tração na camada de desgaste e avalia o fendilhamento transversal.

Para cada sub-camada são ainda calculados cinco quintis (20 % cada) para cada mês, assumindo uma distribuição normal, conforme ilustrado na Figura 3.5.

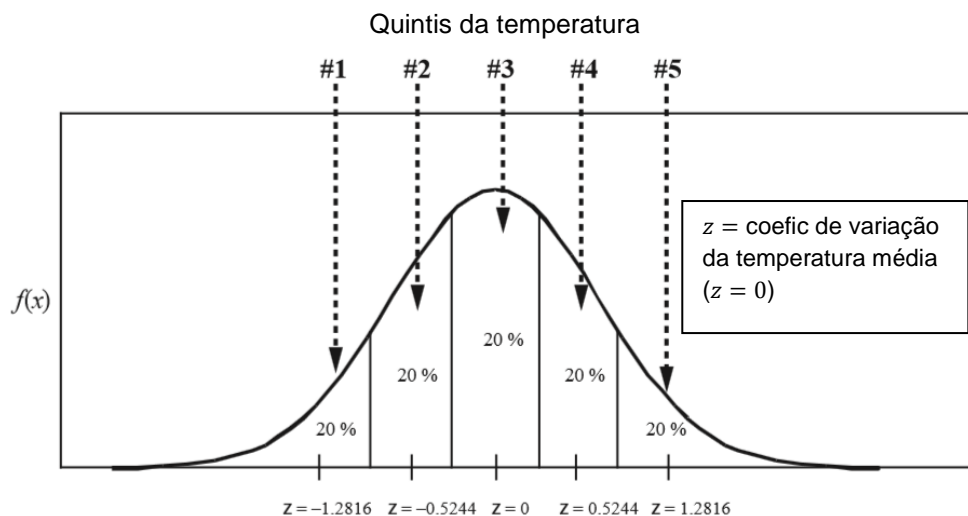


Figura 3.5 – Quintis da temperatura, utilizados para determinar algumas propriedades dos materiais.

A temperatura média de cada quintile em cada sub-camada para cada mês (considerando um tráfego de veículos pesados igual para cada sub-camada) é usada para calcular o módulo dinâmico. Esta propriedade é usada para avaliar as tensões verticais e horizontais em profundidades críticas e localizar o maior dano por fadiga e determinar o valor máximo da deformação permanente das camadas betuminosas.

Hall, et al, 2011, realizaram uma análise da relação dos parâmetros do clima com as degradações: pele de crocodilo, deformação total e IRI. Utilizaram os dados disponíveis para o estado do Arkansas e correram a aplicação DARWin-ME, alterando numa 1ª fase, apenas os *inputs* do clima para as diferentes estações metereológicas e, numa 2ª fase, os do clima e o (TMDA)<sub>p</sub> para valores de 10<sup>3</sup> e 10<sup>5</sup>. Estes autores concluíram que:

- a temperatura foi o fator que mais influenciou a pele de crocodilo (com um valor de influência de 43 %, aproximadamente, face ao universo de 100 % das variáveis de clima utilizadas). A relação é negativa, ou seja, quanto menor a temperatura, menor a pele de crocodilo;
- a temperatura foi também o fator primordial quando se analisou a influência das variáveis climáticas na deformação total. A relação é negativa, ou seja, quanto menor a temperatura, menor a deformação total;



### 3.2.5 Degradações do pavimento

O MEPDG oferece mais informações relativas ao desenvolvimento de degradações durante o ciclo de vida do pavimento escolhido. A partir desta informação, os projetistas podem decidir quando e como programar a manutenção do pavimento e, ao mesmo tempo, cumprir os requisitos dos utilizadores (Petry, et al., 2008). O MEPDG considera 6 tipos de degradação, conforme apresentado no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Tipo de degradação considerada pela aplicação DARWin-ME para pavimentos flexíveis.

<p><b>Deformação permanente (camada betuminosa)</b></p>	<p>A deformação das camadas flexíveis, também conhecida por rodeiras, é causada pela “ação da passagem das rodas” dos veículos que circulam na via e localiza-se preferencialmente na zona de passagem dos pneus dos veículos (Domingos, 2009). Esta ondulação pode também ocorrer devido a deficiências na distribuição de ligante em camadas de desgaste constituídas por revestimento superficial (AASHTO, 2008). Quando as rodeiras são elevadas podem causar preocupações de segurança na circulação rodoviária (Domingos, 2009).</p>
<p><b>Deformação permanente (total)</b></p>	<p>A deformação total considera a contribuição de todas as camadas do pavimento e ainda do leito do pavimento. Esta degradação relaciona-se com a redução de capacidade de suporte nas camadas granulares, o que pode acontecer, por exemplo, devido à entrada de água, quer junto à berma quer por fendilhamento ao longo do eixo (Branco, et al., 2006). A deformação total acarreta preocupações de segurança na circulação rodoviária quando atinge valores elevados (AASHTO, 2008).</p>
<p><b>Pele de crocodilo (fendilhamento por fadiga bottom-up)</b></p>	<p>A pele de crocodilo inicia-se na base da camada betuminosa e propaga-se para a superfície. Acontece no local de passagem dos pneus dos veículos e tem como principal motivo o fato de esta assumir uma parte da distribuição de carga superior àquela para a qual foi projetada (Domingos, 2009). Quando o fendilhamento, tipo pele de crocodilo, acelera dá-se início a um processo de intervenção significativa e que leva ao encerramento das estradas (AASHTO, 2008).</p>
<p><b>Fendilhamento longitudinal, por fadiga (fendilhamento por fadiga top-down)</b></p>	<p>O fendilhamento por fadiga é uma das degradações mais frequentes nos pavimentos flexíveis. As fissuras iniciam-se em pontos onde a deformação por tração é crítica e ocorre tensão. A localização da deformação crítica depende de vários fatores, de entre os quais a rigidez da camada e a configuração da carga são os mais importantes (NCHRP, 2004). As fissuras observam-se geralmente nos pavimentos com elevada espessura das camadas betuminosas e, raramente, chegam às camadas granulares (Domingos, 2009).</p>
<p><b>IRI - Índice Internacional de Rugosidade</b></p>	<p>Este índice representa o perfil do pavimento na zona da passagem dos pneus dos veículos. Um valor crítico é alcançado quando os condutores consideram que a qualidade de circulação é inaceitável. O IRI é função do fendilhamento longitudinal, fendilhamento transversal, pele de crocodilo e deformação permanente bem como do clima e de fatores de fundação (AASHTO, 2008) e é o indicador mais importante na satisfação da circulação do público nas estradas (Darter &amp; Barenberg, 1976).</p>
<p><b>Fendilhamento transversal, térmico</b></p>	<p>Esta degradação é causada pela baixa temperatura, o que pode resultar em fendas transversais ao longo das vias de circulação. Estas fendas desenvolvem-se maioritariamente à superfície do pavimento onde a temperatura é mais baixa. Dependendo da magnitude das forças e da resistência do pavimento betuminoso, as fissuras térmicas podem desenvolver-se em pontos diferentes ao longo do pavimento (Haas, et al., 1987). Esta degradação torna-se crítica quando o fendilhamento resulta numa irregularidade significativa (AASHTO, 2008).</p>

O MEPDG calcula a evolução das degradações ao longo do tempo. As expressões utilizadas são, essencialmente, equações já utilizadas em projeto rodoviário que foram posteriormente adaptadas a novas relações e calibradas com dados reais dos E.U.A., através de regressões.

Estas equações só se encontram no sistema americano de unidades. A aplicação, para calcular a evolução de desempenho do pavimento efetua uma dupla conversão: quando inseridos os dados em sistema internacional (SI), a aplicação converte-os para o sistema americano, aplica as expressões de cálculo, volta a converter os dados e devolve-os como *output* em SI.

#### a. Deformação das camadas betuminosas

O cálculo da deformação permanente, nas camadas betuminosas, teve origem numa análise estatística, em laboratório, de ensaios com repetição de carga. O modelo resultante foi:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = aT^bN^c \quad (3.11)$$

onde,

$\varepsilon_p$	Deformação plástica acumulada em N repetições de carga
$\varepsilon_r$	Deformação elástica do material betuminoso como função de propriedades da mistura, temperatura e taxa de duração de carga
$N$	Número de repetições de carga de eixos
$T$	Temperatura do pavimento
$a, b, c$	Coefficientes de regressão não-linear

Esta equação serviu de ponto de partida, no entanto, revelou-se necessária a utilização de fatores de ajustamento. Estes coeficientes foram determinados pela calibração-validação de dados do programa LTTP.

Um dos estudos iniciais deste modelo foi desenvolvido por Leahy (1998). Utilizou mais de 250 misturas betuminosas sujeitas a cargas repetidas. Avaliou o comportamento da deformação de um total de 2860 pontos e determinou várias regressões para prever diferentes parâmetros de resposta (Leahy, 1989).

Uma análise de sensibilidade ao modelo mostrou que a temperatura era a variável mais importante. Com um  $R^2 = 0,76$ , o modelo foi considerado bom estatisticamente, no entanto, o aumento de variáveis independentes que contribuiu para esta boa adequação do modelo também limitou a sua utilidade (NCHRP, 2004).

Ayres (2002) também analisou os dados que Leahy utilizou, bem como, mais alguns dados recolhidos em laboratório e desenvolveu um novo modelo na Universidade de Maryland. Apesar de apresentar um valor de  $R^2 = 0,73$  (Ayres, 2002), inferior ao anterior, a diferença compensava o fato de eliminar variáveis e simplificar a implementação do sistema de modelação da deformação (NCHRP, 2004).

Por fim, num estudo efetuado no âmbito do projeto NCHRP 9-19, com dados originários do estudo da Leahy e de resultados dos modelos *SuperPave*, num total de 3.476 pontos de deformação permanente, Kaloush, 2000, desenvolveu diferentes modelos que refletem o uso de um número diferente de variáveis na equação (Kaloush & Witczak, 2000).

A equação com os termos N e T foi selecionada para ser usada no MEPDG. É uma equação relativamente simples para usar no processo de implementação (equação 3.12).

$$\Delta_p(HMA) = \varepsilon_p(HMA) \times h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_r(HMA) 10^{k_{1r}} n^{k_{2r}} \beta_{2r} T^{k_{3r}} \beta_{3r} \quad (3.12)$$

onde,



$\Delta_{p(HMA)}$	Deformação plástica vertical, em cada camada betuminosa (in)
$\varepsilon_{p(HMA)}$	Deformação axial plástica, em cada camada betuminosa (in)
$h_{HMA}$	Espessura de cada camada betuminosa (in)
$\varepsilon_{r(HMA)}$	Deformação elástica calculada pelo modelo de resposta estrutural no ponto médio de cada camada betuminosa (in/in)
$n$	Número de repetições de carga de eixos
$T$	Temperatura do pavimento (°F)
$k_z$	Fator de confinamento de profundidade (eq. abaixo)
$k_{1r}, k_{2r}, k_{3r}$	Parâmetros de calibração global (NCHRP 1-40D)
$\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$	Constantes de calibração da mistura ou local (para calibração global, estas constantes assumem o valor de 1)
$k_z$	$k_z = (C_1 + C_2 D) \times 0,328196^D$ $C_1 = -0,1039(h_{HMA})^2 + 2,4868h_{HMA} - 17,342$ $C_2 = 0,0172(h_{HMA})^2 + 1,7331h_{HMA} + 27,428$ onde,
	$D$ Profundidade abaixo da superfície (in)
	$h_{HMA}$ Espessura de cada camada betuminosa (in)

### b. Deformação permanente (total)

Para o cálculo da deformação total somam-se os incrementos das deformações de todas as camadas. Realce é feito apenas para o fato de que camadas constituídas por rocha e por materiais estabilizados quimicamente (solo-cimento por exemplo) não apresentam deformação permanente nem têm qualquer contributo para a deformação total do pavimento.

$$\Delta_{p(total)} = \Delta_{p(HMA)} + \Delta_{p(soil)} \quad (3.13)$$

onde,

$\Delta_{p(total)}$	Deformação total do pavimento (in)
$\Delta_{p(HMA)}$	Deformação plástica vertical, em cada camada betuminosa (in)
$\Delta_{p(soil)}$	Deformação plástica vertical, em cada camada não ligada (in)

A deformação é estimada para cada sub-região, no ponto-médio de cada camada constituinte da estrutura de pavimento. A deformação plástica para cada região é a soma das deformações plásticas verticais em cada camada.

Independentemente do tipo de material utilizado, existem 3 fases distintas no comportamento para a deformação permanente, devido a condições de carga, clima e materiais. Neste modelo consideram-se apenas as 2 primeiras fases, calculando a primeira e extrapolando a segunda. Os testes para atingir a 3ª fase consomem muito tempo, são difíceis de realizar e não existem normas para a sua implementação (NCHRP, 2004).

Para calcular a deformação das camadas não-ligadas, começou-se por rever a bibliografia existente. O modelo para o cálculo das deformações de camadas não-ligadas e aterro foi originalmente desenvolvido por Tseng e Lytton (1989).

$$\delta_a(N) = \beta_1 \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left( \frac{\rho}{N} \right)^\beta} \varepsilon_v h \quad (3.14)$$

onde,

$\delta_a$	Deformação permanente para a camada/sub-camada
$N$	Número de repetições de tráfego
$\varepsilon_0, \beta, \rho$	Propriedades dos materiais
$\varepsilon_r$	Deformação elástica imposta em testes laboratoriais para obter as propriedades dos materiais: $\varepsilon_0, \beta, \rho$
$\varepsilon_v$	Deformação elástica vertical média na camada/sub-camada obtida do modelo de resposta principal

$h$	Espessura da camada/sub-camada
$\beta_1$	Fator de calibração para os materiais granulares e de aterro

De acordo com os autores, o rácio  $\varepsilon_0/\varepsilon_r$  foi estimado com base no tipo de material: granular ou solo de aterro.

Foram efetuados vários estudos de sensibilidade ao modelo de Tseng e Lytton, e concluiu-se que a previsão de deformação em camadas não-ligadas estava incorreta e que as tendências não aceitáveis estavam associadas à dependência não-linear (da tensão) na deformação permanente (NCHRP, 2004).

Os modelos foram revistos. Ayres, 2002, usou a mesma base de dados de Tseng e Lytton combinando os dados de material granular e solo de aterro, desenvolveu novas correlações, excluiu características não-lineares do modelo e apresentou uma versão modificada.

No entanto, o uso desta nova versão apresentava algumas incongruências: a previsão de profundidade da deformação tinha alto grau de dispersão e a deformação em aterro era muito elevada (NCHRP, 2004).

El-Basyouny e Witczak desenvolveram um modelo final mais preciso, utilizado na última versão do MEPDG (NCHRP, 2004). Generalizaram o modelo fundamental alterando o declive e interceção no eixo yy da relação  $\varepsilon_0/\varepsilon_r$  para uma relação dos módulos que mantinha o mesmo  $\beta$ . O rácio de deformações na equação é função dos módulos de camada para diferentes níveis de tráfego. Os modelos são corridos para 2 níveis de tráfego diferentes  $N = 1$  e  $N = 10^9$ .

A aplicação DARWin-ME utiliza a seguinte equação para o cálculo da deformação das camadas não-ligadas:

$$\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{soil} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{\rho}{n}\right)^\beta} \quad (3.15)$$

onde,

$\Delta_{p(soil)}$	Deformação plástica vertical, em cada camada (in)
$\beta_{s1}$	Constante de calibração local para abatimento na camada não-ligada (para calibração global, esta constante assume o valor de 1)
$k_{s1}$	Parâmetro de calibração global
$\varepsilon_v$	Deformação elástica vertical média em cada camada, calculada pelo modelo de resposta estrutural (in/in)
$h_{soil}$	Espessura de cada camada (in)
$\varepsilon_0$	Interceção dos eixos dos yy determinada por testes laboratoriais de ensaios de carga para cálculo da deformação permanente (in/in)
$\varepsilon_r$	Deformação elástica imposta em laboratório para obter propriedades dos materiais $\varepsilon_0$ , $\varepsilon$ e $\rho$ (in/in)
$n$	Número de repetições de carga de eixos
$\beta$	$\log(\beta) = -0,61119 - 0,017638(W_c)$ onde, $W_c$ Teor em água (%)
$\rho$	$\rho = 10^9 \left( \frac{C_0}{1 - (10^9)\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}}$ e $C_0 = \ln \left( \frac{a_1 M_r^{b_1}}{a_9 M_r^{b_9}} \right)$
onde,	
$M_r$	Módulo de deformabilidade das camadas não ligadas (psi)
$a_1, a_9, b_1, b_9$	Constantes da regressão

### c. Pele de crocodilo (fendilhamento por fadiga “*bottom-up*”)

A previsão de fendilhamento está associada ao conceito de **danos cumulativos** estudada por Miner’s (Yang, 1993). O dano é calculado como o quociente do número previsto de repetições de tráfego e o número de repetições de carga permitidas (para se atingir o nível de falha).

Na literatura os modelos mais comuns para prever o número de repetições de carga para o fendilhamento por fadiga são função da deformação por tração e da rigidez da mistura (módulo). A fórmula matemática geral é:

$$N_f = C k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} \quad (3.16)$$

onde,

$N_f$	Número de repetições para o fendilhamento por fadiga
$\varepsilon_t$	Deformação de tração em localização crítica
$E$	Rigidez do material
$k_1, k_2, k_3$	Coefficiente da regressão laboratorial
$C$	Fator de ajustamento

Os modelos de fendilhamento por fadiga mais usados são os desenvolvidos pela Shell Oil (Bonnaure, et al., 1980) e Asphalt Institute (MS-1) (AI, 1982) e seguem a forma matemática acima. A diferença passa pelos coeficientes e fator de ajustamento.

Para escolher a equação a utilizar no MEDPG avaliaram-se os modelos da Shell Oil e MS-1 para os dados do estudo LTTP. Desta análise, concluiu-se que o modelo de fadiga MS-1 tinha tendências mais promissoras e que, apesar da previsão dos danos iniciados na base da camada betuminosa serem ainda altos, a percentagem de dano, no qual a fissura se iniciava, era facilmente identificável (ao contrário do modelo da Shell Oil) (NCHRP, 2004). Este modelo possuía menor dispersão, quer para o fendilhamento que se iniciava na base da camada betuminosa quer para o que se iniciava no topo, e apresentava uma boa relação entre o dano e o fendilhamento para secções de camada betuminosa de 4” a 6” e menores que 4” (espessura fina) no fendilhamento *bottom-up* (NCHRP, 2004).

Optou-se, assim, por incorporar o modelo MS-1 no MEPDG, embora se tenha incluído uma constante no modelo de fendilhamento descendente, que não estava no modelo original.

Este modelo (que calcula o número de ciclos para a falha) só descreve a fase inicial do fendilhamento. A segunda fase, a propagação vertical da fissura, é contabilizada pelo fator de ajustamento do modelo. Na literatura existem outros modelos que utilizam duas equações diferentes, como por exemplo, Lytton et al (Lytton, et al., 1993). A terceira fase está associada ao crescimento em área longitudinal onde o fendilhamento por fadiga ocorre, valorada em percentagem da estrada.

O número de eixos de carga para uma degradação incremental dos dois tipos de fendilhamento é:

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C) C_H \beta_{f1} \varepsilon_t^{k_{f2} \beta_{f2}} E_{HMA}^{k_{f3} \beta_{f3}} \quad (3.17)$$

onde,

$N_{f-HMA}$	Número limite de aplicação de cargas de eixo
$\varepsilon_t$	Deformação de tração em localização crítica e calculada pelo modelo e resposta estrutural (in/in)
$E_{HMA}$	Módulo dinâmico da camada betuminosa medido em compressão (psi)
$k_{1r}, k_{2r}, k_{3r}$	Parâmetros de calibração global (NCHRP 1-40D)
$\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$	Constantes de calibração da mistura ou local (para calibração global, estas constantes assumem o valor de 1)

$$C = 10^M$$

$$M = 4,84 \left( \frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69 \right)$$

onde,  
 $V_{be}$  Teor em betume por volume (%)  
 $V_a$  Volume de vazios na mistura betuminosa (%)

$C_H$  Termo de correcção da espessura, dependente do tipo de fendilhamento:

$$CH = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49H_{HMA})}}}$$
 , para pele de crocodilo
 
$$CH = \frac{1}{0,01 + \frac{12,00}{1 + e^{(15,676 - 2,8186H_{HMA})}}}$$
 , para fendilhamento longitudinal

O MEPDG calcula o dano incremental através de uma grelha nas camadas betuminosas, em profundidades críticas (AASHTO, 2008). O índice de dano incremental ( $\Delta DI$ ) é calculado através da divisão do número atual de eixos de carga pelo número permitido de eixos de carga, com um incremento de tempo e intervalo de carga para cada tipo de eixo.

O índice de dano cumulativo ( $DI$ ) é dado por:

$$DI = \sum (\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum \left( \frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_{j,m,l,p,T} \quad (3.18)$$

onde,

- $n$  Número atual de aplicações de carga por eixo dentro de um período específico de tempo
- $j$  Intervalo de carga por eixo
- $m$  Tipo de carga por eixo (simples, duplo, triplo, quádruplo ou configuração especial)
- $l$  Tipo de veículo pesado usando a classificação de grupo de veículos pesados no MEPDG
- $p$  Mês
- $T$  Temperatura mediana para os 5 intervalos de temperatura ou quintis de cada mês (°F)

O processo de calibração do **fendilhamento por fadiga bottom-up** teve 3 passos: estimaram-se os coeficientes para o modelo MS-1; encontrou-se uma correlação para a fadiga de pele de crocodilo e o dano, usando apenas secções com espessura de camada betuminosa superior a 4 in; e finalmente, alteraram-se as camadas finas usando o parâmetro “k” como função da espessura da camada betuminosa (NCHRP, 2004).

A função de transferência final assume que o fendilhamento por fadiga é de 50 % quando o dano é de 100 %.

Para calcular a área de pele de crocodilo aplica-se a expressão:

$$FC_{bottom} = \left( \frac{1}{60} \right) \frac{C_4}{1 + e^{C_1 C_1^* + C_2 C_2^* \log(DI_{bottom} \times 100)}} \quad (3.19)$$

onde,

- $FC_{bottom}$  Área de pele de crocodilo que inicia na base da camada betuminosa (% da área total da estrada)
- $DI_{bottom}$  Índice de dano cumulativo na base da camada betuminosa
- $C_1, C_2, C_4$  Constantes da regressão da função de transferência
- $C_1^*$   $C_1^* = -2C_2^*$
- $C_2^*$   $C_2^* = -2,40874 - 39,748(1 + H_{HMA})^{-2,856}$

onde,

- $H_{HMA}$  Espessura total da camada betuminosa (in)

#### d. Fendilhamento Longitudinal (fendilhamento por fadiga “top-down”)

Tal como realizado para o cálculo da pele de crocodilo, procurou desenvolver-se uma função de transferência que correlacionasse os danos previstos com o fendilhamento medido, para um erro mínimo.

Uma vez que foi assumido de início que o fendilhamento à superfície podia ter origem nas cargas, nas deformações à superfície, nas condições térmicas, ou na sua combinação, foram realizadas várias análises para testar todas as hipóteses. Durante estes testes concluiu-se que o fendilhamento longitudinal era maior para temperaturas médias anuais do ar mais elevadas (50-60°F) e que a rigidez da fundação influencia o nível de fissura: quanto maior a rigidez, maior a quantidade de fendilhamento longitudinal (NCHRP, 2004).

O modelo de fadiga relacionado com a deformação de tração na superfície da estrada forneceu a melhor adequação aos valores observados no terreno. Identificou-se que os valores máximos de deformação de tração estão associados à deformação de tração na superfície e no meio das rodas das configurações simples, duplas, triplas e quádruplas dos veículos.

Depois de definido um cenário final, iniciou-se o processo de calibração, seguindo os passos da modelação realizada para o cálculo da área de pele de crocodilo.

A função de transferência final assume que o fendilhamento por fadiga à superfície é de 5.000 ft/mile para um dano de 100 %.

Para calcular o comprimento das fendas longitudinais, aplica-se a expressão:

$$FC_{top} = 10,56 \frac{C_4}{1 + e^{C_1 - C_2 \log(DI_{top})}} \quad (3.20)$$

onde,

$FC_{top}$	Comprimento das fendas longitudinais que se iniciam no topo da camada betuminosa (ft/mi)
$DI_{top}$	Índice de dano cumulativo junto à superfície da camada betuminosa
$C_1, C_2, C_4$	Constantes da regressão da função de transferência

#### e. Irregularidade longitudinal (IRI)

Os estudos consultados mostraram que o IRI, índice que reflete o estado da irregularidade do pavimento à superfície, estava relacionado com parâmetros locais, de projeto e de clima e com várias degradações no pavimento (NCHRP, 2004). As principais variáveis apontadas eram: deformação do pavimento, variação na profundidade da deformação e fendilhamento por fadiga. As deformações causadas por movimentos dos solos e o IRI inicial, após construção, eram também apontados como fatores significativos para o cálculo do IRI final.

Para testar as teorias anteriores, foi necessário escolher um modelo base. Na literatura encontraram-se diferentes modelos que conseguiram traduzir com sucesso a irregularidade do pavimento. Os modelos considerados foram: equação de manutenção da AASHTO (Carey & Irick, 1990), estudo de manutenção do pavimento da FHWA (Darter & Barenberg, 1976), modelo HDM-III do World Bank (Paterson, 1989) e estudo do Departamento de Transportes do Illinois (Al-Omari & Darter, 1992).

Foi também analisado o efeito de cada uma das degradações, apontadas anteriormente, na irregularidade do pavimento por Paterson, Darter, Barenberg e Al-Omari (Al-Omari & Darter, 1992) (Darter & Barenberg, 1976) (Paterson, 1989) (Yu, et al., 1998).

Para definir uma expressão adequada no MEPDG, reuniram-se as secções de estudo (do programa LTPP) com as degradações identificadas anteriormente, analisaram-se os dados e desenvolveu-se um modelo de previsão. Optou-se por uma regressão linear, onde o IRI podia ser calculado incrementalmente e adicionado ao IRI inicial.

Este modelo foi depois sujeito a validação e análise de sensibilidade, a qual comprovou a sua adequabilidade.

Para prever a irregularidade do pavimento flexível à superfície, o MEPDG usa uma equação que foi desenvolvida a partir dos dados do programa LTPP. Quanto maior a irregularidade maior o IRI:

$$IRI = IRI_0 + 0,0150(SF) + 0,400(FC_{total}) + 0,0080(TC) + 40,0(RD) \quad (3.21)$$

onde,

<i>IRI</i>	Índice internacional de rugosidade
<i>IRI<sub>0</sub></i>	IRI inicial após construção (in/mi)
<i>FC<sub>total</sub></i>	Área de fendilhamento por fadiga (% da área total da via). Todas as cargas relacionadas com fissuras são combinadas numa área – fendilhamento longitudinal, pele de crocodilo e fendilhamento reflexo no rasto da roda.
<i>TC</i>	Comprimento da fenda transversal (ft/mi)
<i>RD</i>	Profundidade média do sulco (in)
<i>SF</i>	Fator local: $SF = Age[0,02003(PI + 1) + 0,007947(Precip + 1) + 0,000636(FI + 1)]$
	onde,
<i>Age</i>	Idade do pavimento (anos)
<i>PI</i>	Índice de plasticidade do solo (%)
<i>Precip</i>	Precipitação média anual (in)
<i>FI</i>	Índice de congelação média anual (°F.dias)

#### f. Fendilhamento transversal, térmico

O modelo de fendilhamento térmico utilizado no MEPDG resultou de uma versão melhorada do modelo de fendilhamento térmico de *SuperPave* (TCMODEL), inicialmente desenvolvido no âmbito do projeto SHRP A-005.

Para incorporação do TCMODEL no MEPDG, Witczak et al. (2000) realizaram um estudo, no âmbito do projeto de investigação NCHRP 9-19 no qual modificaram e recalibraram o modelo e desenvolveram documentação sobre o mesmo.

Esta calibração contou com 3 níveis de análise, nas quais se variaram os valores dos principais *inputs* – *creep compliance* e a força de tração – num total de 42 secções de pavimento. Seguiram ainda dois caminhos de análise para cada nível: o uso de temperaturas do pavimento reais e temperaturas estimadas baseadas no modelo avançado de integração do clima (EICM). Para o cálculo dos parâmetros de fratura do modelo de fendilhamento térmico foram utilizadas funções alteradas do estudo inicialmente levado a cabo por Schapery, Molenaar e Lytton (Schapery, 1973).

Concluiu-se que este modelo TCMODEL “alterado”, utilizado no guia da aplicação MEPDG em 2002, apresentava um mau desempenho para a análise de nível 3 (NCHRP, 2004).

Para otimizar a correlação das variáveis para este nível, foi realizada nova calibração e validação, levada a cabo pela Universidade do Arizona (ASU, 2003), comparando dois tipos diferentes de dados. Foram estimados novos parâmetros e os desvios padrão estimados foram inferiores ao modelo original, para este nível. No entanto, após análise de sensibilidade concluiu-se que o modelo apresentava maior variação e menor adaptação à realidade.

Optou-se por utilizar o modelo “alterado”, já utilizado no guia de 2002.

A quantidade de propagação da fissura induzida por ciclos de congelamento é calculada pela Lei de Paris:

$$\Delta C = A(\Delta K)^n \quad (3.22)$$

onde,

$\Delta C$	Varição da profundidade da fissura devido a um ciclo de congelação
$\Delta K$	Varição do fator de intensidade da tensão devido a um ciclo de congelação
$A, n$	Parâmetros de fratura para misturas betuminosas
	$A = 10^{k_t \beta_t (4,389 - 2,52 \log(E_{HMA} \sigma_m^n))}$
	onde,
	$n = 0,8 \left(1 + \frac{1}{m}\right)$
$k_t$	Coefficiente determinado pela calibração global para cada nível de <i>input</i>
$E_{HMA}$	Módulo de tração indireta do betuminoso (psi)
$\sigma_m$	Força de tração da mistura (psi)
$\beta_t$	Fator de calibração local ou da mistura
$m$	<i>m-value</i> da curva de <i>creep compliance</i> da tração indireta, medida em laboratório

O fator de intensidade da tensão, da expressão anterior, usa uma equação desenvolvida pelo estudo teórico de elementos finitos.

$$K = \sigma_{tip} [0,45 + 1,99(C_0)^{0,56}] \quad (3.23)$$

onde,

$\sigma_{tip}$	Campo de tensões resultante do modelo de resposta do pavimento à profundidade do extremo da fissura (psi)
$C_0$	Comprimento da fissura atual (ft)

O MEPDG prevê o grau de fendilhamento através de uma distribuição de probabilidade.

$$TC = \beta_{t1} N \left[ \frac{1}{\sigma_d} \log \left( \frac{C_d}{H_{HMA}} \right) \right] \quad (3.24)$$

onde,

$TC$	Quantidade de fendilhamento térmico (ft/mi)
$\beta_{t1}$	Coefficiente de regressão determinado através de calibração global
$N[z]$	Distribuição normal do acontecimento $z$
$\sigma_d$	Desvio-padrão do logaritmo da profundidade das fissuras no pavimento (in)
$C_d$	Profundidade da fissura (in)
$H_{HMA}$	Espessura da camada betuminosa (in)

### 3.2.6 Critérios de desempenho

Os **critérios de projeto** são valores limite definidos *a priori* para cada tipo de degradação e têm como objetivo verificar as competências do pavimento projetado. Devem assumir valores legais ou baseados na experiência, como valores utilizados pelas concessionárias e devem ser considerados em conjunto com os níveis de confiança na avaliação de um projeto.

Para esta dissertação escolheram-se os valores constantes no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Valores assumidos para critérios de projeto, considerando estradas secundárias.

Critério de desempenho	Valor máximo para período de dimensionamento
Pele de crocodilo	35 % (valor por omissão da aplicação DARWin-ME)
Deformação permanente (total)	16,5 mm (AASHTO, 2008) (valor recomendado para estradas com $v < 72$ km/h)
IRI	3 m/km (CETO Cap 15.03) (valor para 100 % das medições)

O grau de confiança pode definir-se como:

“em cada 10 projetos que são projetados e construídos, usando o MEPDG, e para os quais tenha sido definido um grau de confiança de 90 % para, por exemplo, o fendilhamento por fadiga, 1 dos projetos, em média, irá atingir um valor mais alto do que o valor limite definido para fendilhamento por fadiga no fim do período do projeto” (AASHTO, 2008).

Do ponto de vista probabilístico pode considerar-se que o grau de confiança de desempenho do pavimento é a probabilidade de que a secção de pavimento projetada irá permanecer satisfatoriamente sob a ação de tráfego e clima durante o período de vida do projeto (AASHTO, 1993). Esta relação pode ser observada na Figura 3.6 e Figura 3.7.

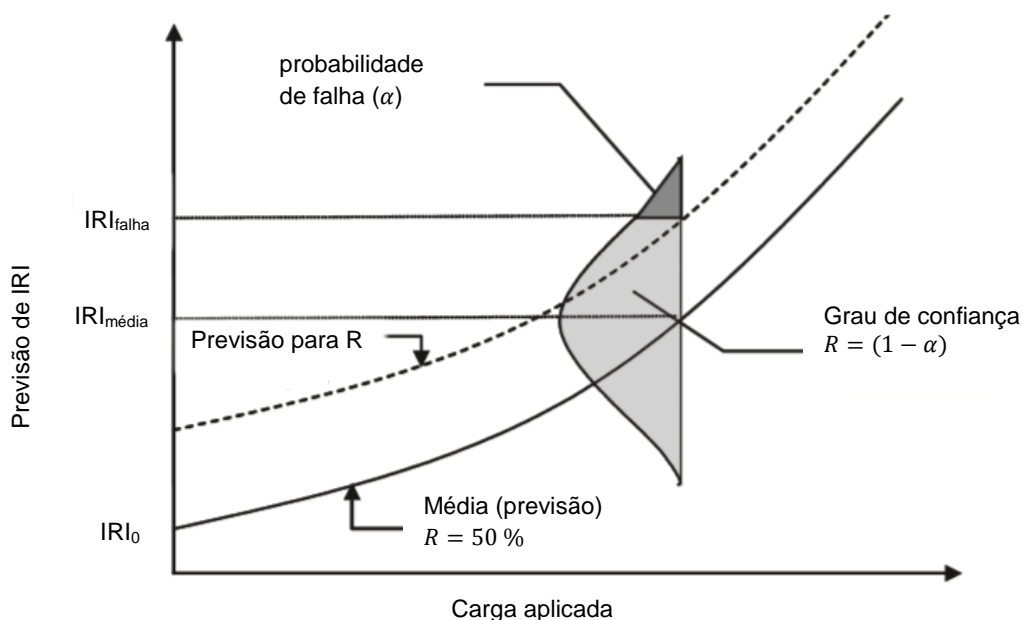
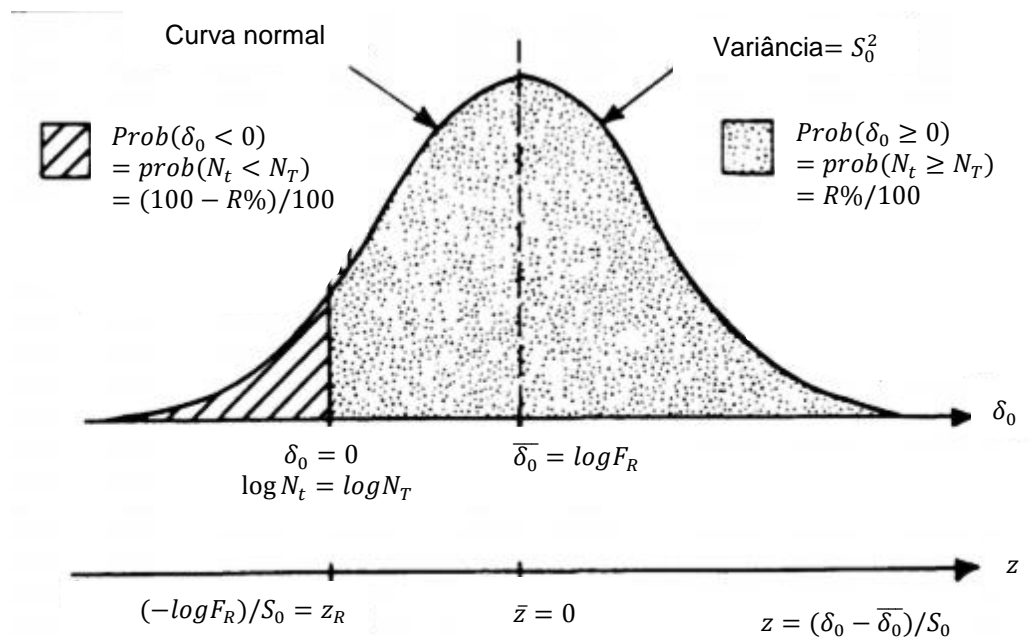


Figura 3.6 – Conceito de grau de confiança do projeto para o cálculo da irregularidade (IRI) (AASHTO, 2008).

Na Figura 3.6, relaciona-se, como exemplo, a evolução do IRI com o acumular de carga aplicada. O grau de confiança do projeto, no momento definido como fim do período de dimensionamento, é construído com base em dois pontos: previsto e limite. Recorrendo à curva normal, calcula-se o grau de confiança do projeto.





Legenda: R – grau de confiança;  $N_t$  – tráfego atual;  $N_T$  – tráfego limite; z – variável  $\delta_0$  normalizada

Figura 3.7 – Distribuição de probabilidade para desvios ( $\delta_0$ ) de desempenho de projeto (AASHTO, 1993).

Na Figura 3.7, a área à direita (com pontos), definida por  $\delta_0 \geq 0$ , corresponde à probabilidade de  $N_t \geq N_T$ , ou seja, de que a seção de pavimento sobreviva ao período de tráfego. Esta probabilidade é definida para ser o grau de confiança R/100 do comportamento do pavimento em projeto, no qual R é expresso em percentagem (AASHTO, 1993). O fator de confiança do projeto é dado pela expressão:

$$F_R = 10^{-z_R S_0} \quad (3.25)$$

onde,

$F_R$	Fator de confiança do projeto
$z_R$	Valor de z no ponto para o qual $N_t = N_T$
	Em que,
	$N_t$ Tráfego atual
	$N_T$ Tráfego limite, no qual se atinge o ponto de degradação
$S_0$	Desvio-padrão

O critério de desempenho e o grau de confiança devem ser adaptados pois afetam os custos de construção e o desempenho de pavimento. Selecionar, por exemplo, um valor limite de pele de crocodilo baixo (3%) e um grau de confiança elevado (97%) pode comprometer o projeto uma vez que ou o torna impossível de realizar ou acarreta custos elevados.

Para ajudar o projetista a alcançar os critérios considerados, o manual de dimensionamento da AASHTO (AASHTO, 2008) indica, com base nas expressões que utiliza, algumas alterações suscetíveis de criar impacto na previsão das degradações. Aponta, como exemplo, a estabilização de leito do pavimento para solos vulneráveis ou colocação de camada de aterro em solos selecionados com compactação adequada caso a deformação permanente seja um dos critérios de desempenho crítico. Para um valor de fendilhamento por fadiga longitudinal crítico aconselha o uso de betume mais deformável ou betume modificado em camada de desgaste, entre outras alterações.

O manual de dimensionamento estabelece algumas alterações ao projeto no sentido de ajudar a cumprir os critérios de desempenho, no entanto, os próprios critérios de desempenho também devem ser escrutinados de forma a conseguir alcançar uma estrutura de pavimento com base no dimensionamento mais correto.

A previsão do IRI é função de vários fatores. Este parâmetro resulta da combinação de valores de previsão, associados a vários modelos de previsão, o que pode levar a que exista uma redução de exatidão no valor final, devido à acumulação de erros, proveniente dos diferentes modelos (Ahammed, et al., 2011). Por isso, recomenda-se que o IRI seja utilizado como critério mas de forma cautelosa (Ahammed, et al., 2011).

O fendilhamento por fadiga também é um elemento sensível quando considerado um projeto: “É recomendável que a previsão inicial relativa ao fendilhamento por fadiga não seja considerada. Deve verificar-se o parâmetro de resposta crítica do pavimento e a metodologia. A equação de transferência dos danos cumulativos e fendilhamento longitudinal deve ser usada com atenção ao tomar decisões baseadas na adequação do projeto devido a este tipo de degradação” (AASHTO, 2008).

### **3.3 Implementação local do MEPDG**

Os modelos de desempenho utilizados pela aplicação DARWin-ME baseiam-se em equações existentes à data que foram posteriormente alteradas com recurso a previsões estatísticas e fatores de calibração. Estes fatores surgem da adaptação das funções às bases de dados dos E.U.A.. No entanto, face à dimensão deste país, os modelos de desempenho apresentam variabilidade muito elevada relativamente aos seus resultados, para o processo global de calibração (AASHTO, 2008):

- a análise à equação utilizada para o cálculo da deformação total mostra que a relação entre os valores medidos e calculados para a profundidade total do sulco apresenta um  $R^2$  (coeficiente de correlação) de 0,577 para um universo de 334 pontos;
- a análise da relação entre o dano cumulativo à fadiga e os valores medidos para área total de pele de crocodilo, para um universo de estudo de 405 pontos, apresenta um  $R^2$  de 0,275;
- a análise do IRI foi realizada através da comparação de valores medidos e valores calculados de IRI. Para um universo de 1926 pontos em pavimentos flexíveis novos e em reforço de camadas betuminosas apresenta um desvio padrão de 18,9 in/mi e um  $R^2$  de 0,56.

Os valores de  $R^2$  apresentados são baixos. Um valor de 0,577 mostra que o modelo, para um processo de calibração global, explica apenas 58 % dos valores medidos de degradações do pavimento.

Como consequência, é necessário calibrar os modelos localmente tendo em conta materiais locais, tráfego e condições ambientais (Muthadi & Kim, 2008) para que possam traduzir da melhor forma a evolução das degradações do pavimento. Uma calibração correta do modelo de previsão pode resultar num projeto de pavimento de confiança e permite que as agências tenham um plano de manutenção preciso (Kang & Adams, 2008).

Esta calibração tem vindo a ocorrer nos últimos anos. Daqui têm resultado relatórios dos diferentes estados, onde o modelo é aplicado e é analisada a adaptabilidade da calibração global através de comparação dos resultados do modelo com dados reais. Para além deste estudo, são ainda apresentados modelos calibrados localmente.

No Quadro 3.9 apresenta-se um resumo das análises da evolução das degradações usando a calibração global da aplicação MEPDG, elaboradas por alguns estados dos E.U.A..

Quadro 3.9 – Adaptação da calibração global, realizada por diferentes estados dos E.U.A..

	Pele de Crocodilo	Fendilham. transversal	Deformação cam. betum.	IRI	Fendilham. longitudinal	Deformação total
Utah	ok	inadaptado	ok	ok	-	-
Arizona	p/ defeito	-	p/ defeito	-	p/ excesso	aterro p/ defeito base p/ excesso
Arkansas	-	-	-	-	p/ defeito	-
Iowa	-	-	-	ok	-	p/ excesso
Kansas	-	-	ok	-	p/ defeito	-
Michigan	ok	p/ excesso	p/ excesso	ok	ok	-
Minnesota	-	p/ defeito	-	-	-	-
Montana	p/ excesso	p/ excesso	-	-	inadaptado	-
North Carolina	p/ defeito	-	-	-	-	p/ excesso
Ohio	-	ok	-	-	-	p/ excesso
Washington	ok	ok	p/ defeito	p/ defeito	-	-
South Carolina	p/ defeito	-	p/ excesso		p/ defeito	-

Utah (Darter, et al., 2009); Arizona (Souliman, et al., 2010); Arkansas (Hall, et al., 2011); Iowa (Kim, et al., 2010); Kansas (Khanum, et al., 2008); Michigan (Buch, et al., 2008); Minnesota (Velasquez, et al., 2009); Montana (Von Quintus & Moulthrop, 2008); North Carolina (Muthadi & Kim, 2008); Ohio (Mellela, et al., 2009); Washington (Li, et al., 2009); South Carolina (Stires, 2009).

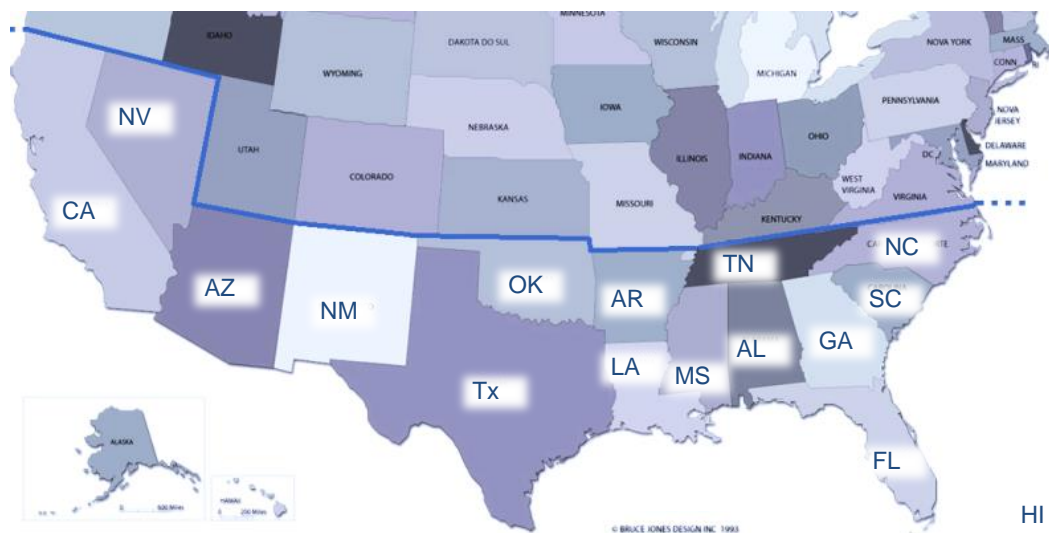
Pela observação do Quadro 3.9 pode concluir-se que a calibração global do MEPDG não se adapta de igual forma aos estados. Este comportamento é compreensível, uma vez que a dimensão dos E.U.A. leva a que existam condições muito variadas, nomeadamente no clima, um dos fatores importantes no cálculo do desempenho dos pavimentos.

A implementação que tem vindo a ser realizada nos E.U.A. é uma mais-valia e pode servir de base ao estudo português. Considerando as bases de dados presentes na aplicação DARWin-ME e alguns dados do estudo anterior pode identificar-se qual o estado norte-americano que mais se assemelha, em termo de clima, ao caso português.

Para isso, recolheram-se os dados do clima dos estados mais a sul dos E.U.A., identificados na Figura 3.8.

Os dados das diferentes cidades foram tratados de acordo com cinco parâmetros de condições climáticas pertinentes, identificados no estudo de Hall, et al, 2011 (consultar capítulo 3.2.4), nomeadamente, temperatura média anual, precipitação média anual, dias de precipitação, índice de congelamento e ciclos de gelo/degelo.

No Quadro 3.10 está um resumo dos dados de Portugal e dos estados em análise nos E.U.A..



Legenda: FL – Florida; Tx – Texas; LA – Luisiana; HI – Hawaii; GA – Georgia; MS – Mississipi; NM – New Mexico; SC – South Carolina; AL – Alabama; AR – Arkansas; AZ – Arizona; CA – California; NC – North Carolina; NV – Nevada; OK – Oklahoma; TN – Tennesse.

Figura 3.8 – Estados analisados, abaixo da linha azul (<http://www.paises-america.com/>).

Quadro 3.10 – Resumo do clima de Portugal e de alguns estados dos E.U.A..

	Temperatura média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Dias de precipitação (dias)	Índice de congelamento (°C.dia)	Ciclos gelo/degelo
PT	16,9	514,3	170,2	1,5	1,4
FL	22,6	1308,0	174,1	9,2	2,6
TX	19,7	802,2	126,0	68,2	19,3
LA	19,5	1410,1	160,9	38,9	14,6
HI	24,3	980,8	229,3	0,5	0,0
GA	17,4	1148,3	158,4	106,6	32,1
MS	18,1	1463,5	162,1	95,0	27,3
NM	13,3	277,3	111,1	518,4	100,1
SC	16,9	1104,5	157,6	114,6	36,3
AL	17,8	1371,4	166,1	104,0	28,4
AR	15,9	1137,6	156,7	221,0	44,9
AZ	17,4	258,4	91,9	259,3	56,3
CA	16,0	396,0	84,2	58,0	16,2
NC	15,7	1097,9	162,8	173,9	47,2
NV	14,2	172,6	91,8	566,7	86,2
OK	15,9	686,5	126,3	306,6	55,5
TN	15,3	1352,6	174,8	246,9	45,7

PT – Portugal; FL – Florida; Tx – Texas; LA – Louisiana; HI – Hawaii; GA – Georgia; MS – Mississipi; NM – New Mexico; SC – South Carolina; AL – Alabama; AR – Arkansas; AZ – Arizona; CA – California; NC – North Carolina; NV – Nevada; OK – Oklahoma; TN – Tennesse.

Para comparar os dados dos E.U.A. com o caso de Portugal, seguiram-se os seguintes passos:

1. cálculo da diferença entre os valores de cada estado dos E.U.A. e de Portugal, para cada parâmetro;
2. redução das diferenças à mesma escala 0-100, através do intervalo mínimo-máximo de cada parâmetro;
3. identificação e aplicação de coeficientes para ponderar cada um dos parâmetros da equação de comparação:

$$\sum_i \text{coeficiente}_i \times \text{diferença}_i \quad (3.26)$$

onde  $i$  corresponde a cada parâmetro

No estudo de Hall et al (2011) foram apresentados valores de influência, em %, justificando o peso que cada variável tem no cálculo de desempenho do pavimento. O Quadro 3.11 mostra os pesos das variáveis para cada tipo de deformação.

Quadro 3.11 – Influência das cinco variáveis do clima em estudo no cálculo do desempenho do pavimento (Hall, et al., 2012).

	Temperatura média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)	Dias de precipitação (dias)	Índice de congelamento (°C.dia)	Ciclos gelo/degelo
Pele de crocodilo	43,4	14,4	0	12,4	13,5
Deformação total	33,7	0	0	0	0
IRI	0	0	0	0	16,6
média	25,7	4,8	0,0	4,1	10,0

A média de cada parâmetro foi utilizada como coeficiente de ponderação na análise em curso, uma vez que apenas os fatores relevantes no cálculo do desempenho devem ser alvo de comparação.

Após a aplicação da equação, foram identificados os três estados que se afiguram, em termos de clima, mais semelhantes a Portugal, conforme apresentado no Quadro 3.12. Constata-se que quanto menor o valor da diferença ponderada maior é a similaridade.

Quadro 3.12 – *Ranking* dos estados mais semelhantes a Portugal em termos de clima.

<i>Ranking</i>	Estado	Valor
1º	California	316,4
2º	South Carolina	329,8
3º	Georgia	411,5

Com base na influência apresentada no estudo de Hall, et al, 2011, conclui-se que o estado que mais se assemelha a Portugal, em termos de parâmetros de clima relevantes ao cálculo de desempenho de pavimentos, é a California. Destaca-se pela homogeneidade com valores médios diferentes mas suficientemente próximos dos de Portugal para todos os parâmetros. O estado South Caroline apresenta-se em 2º lugar no *ranking* devido à grande influência da temperatura média no cálculo da evolução das degradações do pavimento (temperatura média igual à de Portugal).

No estudo da implementação do MEPDG em Portugal, estes podem ser dois dos estados a ter como exemplo, analisando a sua implementação com maior atenção.

Esta é uma análise superficial que pretende auxiliar o início do estudo de implementação da metodologia empírico-mecanicista em Portugal, baseada na influência do clima no desempenho dos pavimentos nos E.U.A.. Uma análise à influência das variáveis do clima em Portugal seria diferente uma vez que o índice de congelamento ou ciclo gelo/degelo são irrelevantes no panorama português. Uma nova abordagem a este tema, com base na implementação futura em Portugal, deve reproduzir um resultado diferente, nomeadamente, mostrando a maior relevância da temperatura no cálculo do desempenho do pavimento.

## 4 Proposta de estruturas-tipo de pavimentos com RCD em camadas não ligadas

### 4.1 Materiais

No projeto SUPREMA, os RCD em estudo foram sujeitos a diversos ensaios laboratoriais, para identificação e caracterização das suas propriedades. Com base na sua constituição, os materiais reciclados foram classificados de acordo com o Quadro 2.17.

Os materiais reciclados foram ainda classificados de acordo com os seus parâmetros geométricos, químicos e de comportamento mecânico, conforme o Quadro 2.18.

Após a recolha de toda a informação relativa às características dos materiais, procedeu-se à classificação dos agregados reciclados para as três metodologias apresentadas anteriormente, conforme mostra o Quadro 4.1: especificações LNEC E 473 (LNEC, 2009a) e LNEC E 474 (LNEC, 2009b); guia para a utilização de RCD em vias municipais e rurais e em valas (Rodrigues, 2013) com proposta de alteração das especificações LNEC para este tipo de estradas (doravante designado por Proposta alteração); e guia espanhol (GERD, 2011).

No Anexo IV podem ser consultadas as classificações em detalhe, onde todos os pontos são avaliados e se mostra de forma gráfica o cumprimento dos critérios impostos.

Quadro 4.1 – Classificação do agregado reciclado em camadas não ligadas de pavimentos.

Metodologia		MBB		BBM		COMP	
		Classe	Categoria	Classe	Categoria	Classe	Categoria
LNEC	E 473	-	AGER1/AGER2	C*	AGER1*	C	AGER1
	E 474	MB	MAT1/MAT2	C	MAT1/MAT2	C	MAT1/MAT2
Proposta alteração		MB	todas	C/C1*	todas	C/C1	todas
Guia espanhol		-	-	ARMh	CL4/CL3*	ARMa	todas

\* Não cumpre todos os critérios mas está próximo dos valores limite. Consultar Anexo IV para obter informações mais detalhadas.

O LNEC estabelece que os materiais que não satisfaçam os requisitos previstos na especificação LNEC E 473 podem ser utilizados, desde que o seu desempenho seja comprovado através de estudo específico (LNEC, 2009a). O guia espanhol também refere que as classes não devem ser limitadoras. A qualidade técnica do material, independentemente da sua composição, é o elemento que viabiliza o uso do material numa aplicação (GERD, 2011).

As metodologias consultadas e aqui analisadas prevêm a aplicabilidade dos resíduos de acordo com a categoria e a classe dos materiais, como se pode observar no Quadro 4.2.

Pode concluir-se que os materiais BBM e COMP podem ser aplicados em camadas de sub-base e base. O material MBB apresenta características que inviabilizam a utilização deste material em camadas de base e sub-base, à excepção da metodologia de Proposta alteração que considerada válida a utilização deste material em camada de sub-base.

No Quadro 4.2 consideraram-se, ainda, tanto as categorias e classes cujos critérios associados foram cumpridos como as restantes hipóteses, assinaladas com \* e já identificadas no Quadro

4.1. Uma vez que serão construídos e validados vários cenários não se quis limitar as hipóteses iniciais, tirando posteriormente as ilações adequadas.

Quadro 4.2 – Aplicação recomendada para os agregados reciclados em estudo.

Metodologia		MBB	BBM	COMP
LNEC	E 473	-	sub-base (TMDA <sub>p</sub> < 50)*	sub-base (TMDA <sub>p</sub> < 50)
	E 474	-	leito do pavimento	leito do pavimento
Proposta alteração		sub-base	sub-base, base*, desgaste <sup>(1)</sup>	sub-base, base, desgaste <sup>(1)</sup>
Guia espanhol <sup>(2)</sup>		-	Sub-base, base: T3*, T4* e <T4	Sub-base, base: T3, T4 e <T4

<sup>(1)</sup> Camadas de desgaste em camadas traficadas não revestidas; <sup>(2)</sup> Classes espanholas T3 e T4 correspondem a classes portuguesas T5/T6 e T7, respetivamente. Consultar Quadro 2.12.

\* Não cumpre todos os critérios mas está próximo dos valores limite.

Verifica-se que o material COMP tem um espetro de aplicação mais amplo e apresenta melhores características, tendo maior potencial de apresentar um período de vida útil mais longo.

Fica ainda a nota que a especificação LNEC E 474 prevê a aplicação dos materiais MBB, BBM e COMP em aterro, o que não é alvo de estudo nesta dissertação.


## 4.2 Fundação

O comportamento estrutural do pavimento rodoviário é também condicionado pela fundação e, portanto, pelo tipo de solo que se encontra no local da construção.

O MACOPAV adota 6 classes de solos (S0 a S5) que agrupam diferentes tipos de solo de acordo com as características geotécnicas definidas na norma ASTM D 2487, nomeadamente os valores de CBR. Para este estudo adotaram-se 3 classes de solos, conforme indicado no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Classes de terrenos de fundação (JAE, 1995).

Classe	Descrição	CBR (%)
S2	Argilas, siltes e areia argilosa	[5; 10[
S3	Areias siltosas e mal graduadas	[10; 20[
S4	Areias bem graduadas, cascalho argiloso, siltoso ou mal graduado	≥ 20



O MACOPAV considera 4 classes de fundação (F1 a F4), definidas pelo módulo de deformabilidade. Neste estudo adotaram-se 2 tipos de fundação, F2 e F3, correntes no panorama nacional e com qualidade para fundar pavimentos e capacidade de suporte para assegurar o funcionamento estrutural do pavimento resistindo às ações previstas pelo tráfego T6 e T7. Os módulos de deformabilidade considerados neste estudo foram de 60 MPa e de 100 MPa para F2 e F3, respetivamente, valores de cálculo preconizados pelo MACOPAV.

Ao longo do local de fundação de uma estrada podem encontrar-se terrenos de natureza litológica diferente ou solos de fundação com características variáveis, o que acontece em



muitas estradas devido à orografia do terreno e à necessidade de um traçado cuja rasante obriga a trechos em aterro ou em escavação. Para atenuar os inconvenientes da variabilidade pode recorrer-se à construção de uma camada de leito do pavimento constituída por solo com melhores características mecânicas.

A capacidade de suporte da fundação pode ainda ser alcançada utilizando o solo local, se este garantir as condições adequadas à função de plataforma. O projetista deve definir, de acordo com os ensaios geotécnicos realizados, qual a medida a tomar para garantir as características da classe de plataforma pretendida.

Para sistematizar a escolha do projetista o MACOPAV apresenta a relação classe de solo de fundação – classe de plataforma, com recurso a camada de leito do pavimento, conforme Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Camadas de leito do pavimento dos solos em estudo.

Classe de solo de fundação	Camada de leito em materiais não-ligados	
	F2	F3
S2	15 cm de S4	-
S3	*	20 cm de S4
S4	-	*

\* Em escavação deve ser escarificado e recompactado na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 30 cm bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas.

Dada a avaliação dos materiais reciclados considera-se que os RCD constituídos por BBM e COMP asseguram um solo S4, podendo ser utilizados em leito do pavimento e ajudando a melhorar as características do solo local.

Cada tipo de solo foi ainda classificado de acordo com o sistema AASHTO. Esta associação teve por base as características dos solos escolhidos: classe S3 (A-2-4) e classe S4 (A-1-a/b). A classificação AASHTO destes solos é um passo relevante pois pretende garantir a análise comparativa das estruturas de pavimento na aplicação DARWin-ME.

No Anexo V são apresentados os dados dos materiais utilizados na aplicação DARWin-ME, em detalhe. Estes dados agregam tanto valores conhecidos com base nas características das estruturas de pavimento escolhidas como valores por omissão da aplicação DARWin-ME. Esta aplicação contém uma base de dados dos tipos de fundação, com características pré-definidas.

Na literatura encontra-se a expressão proposta por Claessen et al. (1977) que mostra que quanto mais rígido for o suporte de uma camada não ligada melhor é a sua resposta em termos de capacidade de carga (Branco, et al., 2006), como mostra a equação 4.1.

$$E_g = 0,2 \times h_g^{0,45} \times E_f \quad (4.1)$$

onde,

$E_g$	Módulo de deformabilidade das camadas granulares dos pavimentos (sub-bases e bases) (MPa)
$h_g$	Espessura da camada granular sobre o solo de fundação (mm)
$E_f$	Módulo de deformabilidade da fundação (MPa)

Esta expressão, baseada numa análise elástica-linear, traduz o comportamento das camadas granulares para pavimentos com mais de 15 cm de espessura de misturas betuminosas (Branco, et al., 2006) e é relativa a agregados naturais, pelo que pode ser diferente para agregados reciclados.

No sentido de avaliar a relação de módulos de deformabilidade entre camadas constituídas por material reciclado utilizou-se a relação de valores do módulo de deformabilidade, medidos em obra, na campanha de abril de 2013 do projeto SUPREMA (Simões, 2013), como se pode observar no Quadro 2.19. Optou-se por analisar esta campanha porque foi realizada após o período de inverno, período em que as camadas não ligadas do pavimento e a fundação apresentam menor capacidade de carga, e a que mais se afastou do período de construção, o que implica uma maior estabilização das características das camadas e um comportamento mais próximo do que se espera que o pavimento venha a apresentar durante o período de vida útil do pavimento.

Constatou-se que o valor apresentado pelo ABGE (1,62) não se encaixou no espectro de valores esperados para este material, quer por comparação com o que se conhece para este tipo de materiais quer por comparação com a relação apresentada pela mistura composta por ABGE e MBF (2,47). O expetável seria o agregado natural apresentar um comportamento melhor.

Analisando todos estes resultados, considerou-se a seguinte escala de relações para os materiais, que é essencial para estabelecer correlações para os dois cenários de fundação (F2 e F3):

- MBB e BBM, considera-se uma relação de 1,7 entre camadas de suporte e camadas com este tipo de material, para as camadas quer de sub-base quer de base;
- ABGE, aplicação da relação empírica de Claessen et al. (1977), em que para 20 cm de camada granular a relação de módulos assume o valor de 2,2 e para 15 cm assume o valor de de 1,9;
- COMP, considera-se uma relação de módulos de deformabilidade mediana entre os valores apresentados para os agregados reciclados (MBB e BBM) e para o agregado natural (ABGE). Foi adotado o valor de 2,0 para camadas de 20 cm e o valor de 1,8 para camadas de 15 cm.

### 4.3 Tráfego

Pretende-se analisar pavimentos destinados essencialmente a vias de acesso (distribuidoras locais e acesso local), caminhos florestais e agrícolas. Para tal, foram considerados 3 tipos de tráfego, aos quais se associaram diferentes tipologias de vias:

- T7  $\left[ \begin{array}{l} \text{T7a: } (TMDA)_p < 25 \text{ - vias de acesso local, caminhos florestais e agrícolas} \\ \text{T7b: } (TMDA)_p < 50 \text{ - vias distribuidoras locais, vias de acesso local e caminhos} \\ \text{agrícolas} \end{array} \right.$
- T6:  $(TMDA)_p = [50; 150[$  - vias distribuidoras locais

Em zonas residenciais, o acesso local é apenas para habitação sendo que os veículos pesados no local restringem-se a camiões de recolha do lixo ou, pontualmente, outros veículos como veículos de mudanças. Em zonas florestais e agrícolas o tráfego é muito reduzido limitando-se essencialmente a acesso de propriedades vizinhas. Baseado num tráfego esperado diminuto como realçado nos casos apontados, que se afiguram realidades do panorama nacional, optou-se pela divisão da classe de tráfego T7, tal como existe na norma espanhola que também identifica duas classes distintas para o tráfego mais baixo.

Os valores de taxa de crescimento e fator de agressividade para a classe de tráfego T6 estão de acordo com o correntemente adotado em Portugal (3% e 2%, respetivamente). Para a classe de tráfego T7, também baseado na norma espanhola, optou-se por considerar uma taxa de crescimento de tráfego de 2%, uma vez que a orientação em Portugal, para valores de tráfego pesado inferiores a 50 veíc./dia, obriga a um estudo específico. Já o fator de agressividade para a classe T7 foi considerado o mesmo que para a classe T6 ( $\alpha = 2$ ).

Para cada classe de tráfego foram ainda consideradas distribuições de tráfego. Optou-se por utilizar a classificação de tráfego pesado (TTC) pré-definida na aplicação DARWin-ME e que representa os diferentes cenários estudados a partir das bases de dados do E.U.A..

Estas distribuições agrupam-se em 17 grupos e incluem a classe de tráfego de pesados predominante, percentagem de autocarros e atrelados. Para esta dissertação foram escolhidos dois grupos representativos das vias em estudo:

- grupo 14 – Predominam veículos pesados sem reboque; poucos a nenhuns veículos com multi-reboque; e poucos autocarros (TTC 14);
- grupo 12 – Tráfego misto de veículos pesados sem reboque e com apenas 1 reboque, com predominância de veículos sem reboque; poucos a nenhuns veículos com multi-reboque; e poucos autocarros (TTC 12).

Estes grupos, além de qualitativamente descreverem o tipo de tráfego esperado ainda se destacam pelo foco na predominância de tráfego nas classes correntes em Portugal, como foi possível saber dos estudos em curso no IST: classe F (subclasse F1) e classe H (subclasse H5), correspondentes às classes americanas 5 e 9.

Da análise do Quadro 4.5 observa-se que a diagonal da matriz faz corresponder uma classe de tráfego a um grupo de distribuição de tráfego específico. Para o tipo T6, maior tráfego médio diário anual de veículos pesados, considera-se, ainda, o cenário de distribuição da classe T7, uma vez que em vias distribuidoras locais se observam poucos veículos pesados com reboque.

Quadro 4.5 – Relação entre as classes de tráfego e cenários de distribuição utilizados.

Classe de tráfego Distribuição (TTC)	T7 (T7a e T7b)	T6
<b>Grupo 14</b>	X	X
<b>Grupo 12</b>	-	X

No Anexo VI são apresentados os dados de tráfego utilizados na aplicação DARWin-ME, em detalhe.

O dimensionamento dos pavimentos considera o tráfego em termos de passagens de eixo padrão. Para comparar as metodologias Shell e MEPDG tornou-se imperativo garantir que o número de passagens de eixo padrão equivalente de ambas fosse igual. A forma de atingir o objetivo passou pela comparação de fator de agressividade destas metodologias e correção do número acumulado de veículos pesados (NAV), conforme equação (3.1).

Conforme estudo apresentado no capítulo 3.2.3, os fatores de agressividade considerados pela aplicação DARWin-ME (utilizada para a análise da metodologia MEPDG) para as distribuições TTC 14 e TTC 12 utilizadas foram de 0,6 e 0,7, respetivamente. Para a abordagem da Shell utilizou-se  $\alpha = 2$ . No sentido de garantir uma equivalência nas duas abordagens em termos de

número acumulado de eixos padrão equivalente no período de dimensionamento procedeu-se à ponderação do tráfego para ambas as distribuições:  $NAV P_{novo} = NAV P \times 2 \div 0,6$  para TTC 14 e  $NAV P_{novo} = NAV P \times 2 \div 0,7$  para TTC 12.

#### 4.4 Condições climáticas

Foram utilizados os dados do clima relativos a Beja, Lisboa, Coimbra e Porto, cidades que se considerou terem condições climáticas distintas e representativas das diferentes regiões do país. Os dados do clima para estas cidades são recolhidos por diversas entidades, quer a nível nacional quer internacional. Devido à natureza das aplicações utilizadas para auxiliar as metodologias de cálculo, Shell e MEPDG, os valores de temperatura foram tratados de forma diferenciada.

Na aplicação Bisar foram utilizados os valores de “temperatura de serviço” provenientes do programa automático PAVIFLEX (Baptista, 1999). Este programa foi adaptado às condições portuguesas e devolve previsões aproximadas da realidade, as quais não necessitam de ser submetidas a correções devido à forma de determinação da “temperatura de serviço” (Branco, et al., 2006). A “temperatura de serviço” pretende que a modelação do comportamento das misturas betuminosas no dimensionamento reflita a grande variedade de comportamento associado ao período de vida do pavimento em serviço (Branco, et al., 2006).

Foram consultados os valores em tabela de acordo com o local em estudo, tipo de fundação, F2 e F3, e tipo de tráfego, T6, conforme se pode observar no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Valores de “temperatura de serviço”, PAVIFLEX (Baptista, 1999).

Fundação	Profundidade (cm)	Classe tráfego	Temperatura (°C)			
			Beja	Lisboa	Coimbra	Porto
F2 (E=60 MPa)	16	T6	29,5	27,5	27,5	25,0
F3 (E=100 MPa)	12	T6	28,7	27,1	27,0	24,3

Para a classe de tráfego T7 adotaram-se os valores de T6.

Para ser possível a utilização da aplicação DARWin-ME foram utilizados os valores de temperatura provenientes do estudo do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Este estudo teve como base uma recolha exaustiva de dados, nomeadamente dados de temperatura, precipitação e velocidade do vento em todas as horas do ano para as quatro cidades identificadas acima, que posteriormente, em parceria com a Universidade de Maryland, foram convertidos para o formato “.hcd” (formato de leitura da aplicação DARWin-ME).

#### 4.5 Conceção e dimensionamento das estruturas de pavimento

Um dos objetivos desta dissertação é a apresentação de estruturas de pavimento que possam ser utilizadas para a aplicação de agregados reciclados em camadas de base e de sub-base. O procedimento seguido para alcançar este objetivo e analisar de forma expedita as estruturas passíveis de utilização foi o seguinte:

1. identificação dos elementos fundamentais de dimensionamento de pavimentos e definição de condições de projeto;
2. conceção de pavimentos-tipo de acordo com as condições já consideradas (passo 1);

3. dimensionamento das estruturas de pavimento propostas com base na metodologia da Shell, utilizando a aplicação BISAR;
4. reanálise de resultados e nova tomada de decisão com base na comparação dos resultados com a utilização do MEPDG, recorrendo à aplicação DARWin-ME.

### Passo 1: Condições de projeto

Pretende-se que as estruturas de pavimento a propor correspondam a várias condições de projeto.

Na Figura 4.1 são apresentadas, de forma resumida, as condições base consideradas, em termos de fundação, tráfego, clima (distrito) e vida útil do pavimento.



Figura 4.1– Condições de fundação, tráfego, clima e vida útil do pavimento.

### Passo 2: Conceção de pavimentos-tipo

A conceção das estruturas de pavimento baseou-se no MACOPAV, Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (JAE, 1995) e na ORDEN FOM/3460/2003 (MOPU, 2003).

O MACOPAV, proposto pela JAE em 1995, estabelece estruturas-tipo de pavimentos com base em pressupostos relativos ao tráfego, condições climáticas, condições de fundação e materiais de pavimentação.

A ORDEN FOM/3460/2003 define as estruturas de pavimento a utilizar em Espanha. Atualiza a Ordem Ministerial, de 23 de Maio de 1989, e a Instrucción 6.1 e 2-IC sobre Seções de Pavimentos. Considera novas soluções que reconhecem o normativo vigente, aproveita a experiência anterior na pavimentação e incorpora novos materiais no projeto e novas seções que se esperam assegurar a capacidade estrutural para as categorias de tráfego e fundação e aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de pavimento.








Estes documentos foram consultados e com base nas informações reunidas relativas a materiais, fundação, tráfego e condições climáticas construiu-se um quadro resumo, Quadro 4.7, com as estruturas de pavimentos flexíveis que daí resultam.

Uma vez que em Espanha os *inputs* de tráfego e fundação são diferentes dos utilizados em Portugal, foram avaliadas as diferenças e escolhidos os valores que mais se ajustam às condições preconizadas.

Em Espanha existem 3 classes de fundação, conforme indicado no Quadro 2.13. Estas classes estão associadas a intervalos de módulo de deformabilidade da fundação. Estes módulos são determinados de forma diferente em Portugal e em Espanha. Em Portugal determina-se o módulo de deformabilidade no primeiro ciclo de carga, ao contrário de Espanha que tem em conta o segundo ciclo de carga. Correia et al, 1997, estudou o primeiro e o segundo ciclos de

carga que apresenta sob a forma de gráfico e no qual se observa que, para valores na ordem dos 60 MPa a 100 MPa, as diferenças entre ciclos de carga são inferiores a 10 MPa. Com base nesta diferença e uma vez que nesta dissertação se utilizam classes de fundação F2 e F3, para as quais se considera um módulo de deformabilidade médio de 60 MPa e 100 MPa, respetivamente escolheu-se a classe de fundação E1 ( $E \geq 60\text{MPa}$ ), cujo intervalo de módulo de deformabilidade é semelhante às classes F2 e F3 utilizadas em Portugal. Pretende-se encontrar uma estrutura-tipo que tenha como base condições semelhantes às utilizadas para definir uma estrutura-tipo no MACOPAV, não se pretende avaliar o impacto da diferença entre ciclos de carga.

Quadro 4.7 – Estruturas de pavimentos utilizadas em Portugal e Espanha para pavimentos flexíveis (espessuras mínimas das camadas em centímetros).

Fundação Tráfego	Portugal		Espanha	
	F3	F2	T7a	T7b
T7 T7a   T7b (Espanha)				
T6				

[espessuras em cm]

Relativamente ao tráfego, optou-se pela utilização das classes de tráfego espanholas T4.2 e T4.1, que correspondem a um  $\text{TMDA}_p$  máximo de 25 e 50 veic pesados/dia, respetivamente. Estas classes foram replicadas para o modelo apresentado como classes de tráfego T7a e T7b.

Com base nas estruturas-tipo consultadas e considerando que, no caso português, o período de dimensionamento se estende a 20 anos, escolheu-se um conjunto de estruturas de pavimento que se esperava responderem às condições impostas quer ao nível de fundação, tráfego, clima e período de dimensionamento.

No que diz respeito às camadas de misturas betuminosas, consideraram-se estruturas de pavimento constituídas por camada de desgaste em betão betuminoso (AC 14 surf 35/50); camada de regularização/base em mistura betuminosa (AC 20 reg/bin 35/50) (para pavimentos com camada betuminosa superior a 7 cm), base e sub-base em agregado natural ou reciclado.

### Passo 3: Dimensionamento pela metodologia da Shell

Esta dissertação debruça-se sobre a utilização de RCD em camadas granulares de pavimentos flexíveis, não aborda outro tipo de pavimentos como rígidos ou semi-rígidos.

Em geral, o dimensionamento de um pavimento visa definir uma estrutura capaz de responder à intensidade das cargas dos veículos durante a vida do pavimento, manter a sua qualidade funcional e estrutural e evitar que as degradações ultrapassem os limites considerados antecipadamente aceitáveis.

A avaliação do comportamento da estrutura de um pavimento é realizada com base no cálculo dos estados limites de ruína do pavimento, definidos em função do número acumulado de eixos padrão.

Em Portugal, os estados limites de ruína do pavimento normalmente considerados no dimensionamento de pavimentos flexíveis são (Branco, et al., 2006):

- fendilhamento por fadiga (fendilhamento excessivo com início nas zonas mais tracionadas das camadas ligadas) relacionado com a extensão radial de tração ( $\varepsilon_t$ ) na base das camadas betuminosas;
- deformação permanente (assentamento excessivo à superfície do pavimento) relacionada com a extensão vertical de compressão ( $\varepsilon_c$ ) no topo do solo de fundação.

A verificação clássica da segurança aos estados limites de ruína do pavimento é efetuada em termos de extensões comparando as extensões aplicadas e as extensões admissíveis, conforme equação 4.2:

$$\varepsilon_{apl} \leq \varepsilon_{adm} \quad (4.2)$$

Na modelação estrutural do pavimento adota-se frequentemente o modelo de Burmister. Este modelo considera que o pavimento é composto por um conjunto de camadas horizontais, contínuas, homogéneas, isotrópicas e elásticas-lineares, assentes sobre um meio semi-infinito, e que na superfície do conjunto de camadas atua uma carga vertical uniformemente distribuída numa área circular.

O cálculo das extensões aplicadas no pavimento é feito recorrendo a programas de cálculo, como por exemplo o BISAR (método da Shell).

As extensões admissíveis são determinadas tendo em conta modelos de degradação associados aos estados limites de ruína, utilizando os critérios propostos pela Shell:

- limitação da extensão máxima de tração na zona inferior das camadas betuminosas;

Este critério visa impedir a rotura por fadiga em tração das camadas betuminosas durante o período de dimensionamento, através da expressão que traduz a lei de fadiga.

$$\varepsilon_{adm}^t = (0,856 \times v_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N_{80}^{-0,2} \quad (4.3)$$

onde,

$\varepsilon_{adm}^t$   
 $v_b$

Extensão de tração admissível  
Porcentagem volumétrica de betume na camada betuminosa inferior

Proposta de estruturas-tipo de pavimentos com RCD em camadas não ligadas

$E_m$	Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa na camada betuminosa inferior (MPa)
$N_{80}$	Número acumulado de passagens do eixo padrão durante a vida útil do pavimento (eixo padrão de 80 kN)

- limitação da extensão vertical de compressão no topo da fundação do pavimento.

Visa reduzir a ocorrência de deformações permanentes e a conseqüente formação de rodeiras.

$$\varepsilon_{adm}^c = K_s \times N_{80}^{-0,25} \quad (4.4)$$

onde,

$\varepsilon_{adm}^c$	Extensão vertical de compressão admissível no topo do solo de fundação
$K_s$	Parâmetro que depende da probabilidade de sobrevivência atribuída no âmbito do dimensionamento do pavimento (toma o valor de $2,1 \times 10^{-2}$ para 85%)
$N_{80}$	Número acumulado de passagens do eixo padrão de 80 kN durante a vida útil do pavimento

O tráfego foi calculado estabelecendo-se o número acumulado de eixos padrão. As estruturas são solicitadas pela ação de um eixo padrão de 80 kN, com raio de distribuição de 10,5 cm e afastamento de 31,5 cm entre rodados.

$$N_{80}^{dim} = 365 \times (TMDA)_p \times C \times \alpha \times p \quad (4.5)$$

onde,

$(TMDA)_p$	Tráfego médio diário anual de veículos pesados (veíc. pesados/dia)
$\alpha$	Fator de agressividade de tráfego
$p$	Período de dimensionamento
$C$	Fator de crescimento do tráfego: $C = \frac{(1+t)^p - 1}{p \times t}$
onde,	
$t$	Taxa média anual de tráfego pesado

Efetou-se uma análise comparativa entre o volume acumulado de tráfego em cada ano e os valores admissíveis determinados pelos critérios relativos aos estados limite de ruína para conhecer o período de vida útil do projeto, antes de ocorrer a rotura e o dano causado aos pavimentos.

O conceito de dano resulta da relação entre os valores dimensionados e admissíveis de passagens de eixos padrão para o período de dimensionamento do pavimento, quer para a fadiga, quer para a deformação permanente:

$$dano (\%) = \frac{N_{80}^{dim}}{N_{80}^{adm}} \times 100 \quad (4.6)$$

onde,

$N_{80}^{dim}$	Número acumulado de passagens do eixo padrão
$N_{80}^{adm}$	Número admissível de eixos padrão: $N_{80}^{adm}_t$ para deformação por fadiga e $N_{80}^{adm}_c$ para deformação permanente

As estruturas de pavimento foram avaliadas por classe de fundação, por clima, por tráfego e por composição da camada granular de base e sub-base. Para as camadas de base e sub-



-base optou-se por utilizar 4 combinações base/sub-base: ABGE/BBM; ABGE/COMP; BBM/BBM; e COMP/COMP. Estas combinações prevêm a existência de apenas um tipo de agregado reciclado no local, que possa ser reaproveitado em camadas granulares e que comporte estruturalmente as cargas exercidas pelo tráfego.

A utilização de ABGE prende-se com 4 condições:

- a. a estrutura de pavimento com recurso a agregado reciclado não assegura o período proposto de 10 anos, ou seja, recorre-se ao agregado natural para aumentar o período de vida útil do pavimento, uma vez que o agregado natural apresenta melhores características que o material reciclado;
- b. quantidade limitada e escassa de material reciclado que não assegure a quantidade requisitada para ambas as camadas;
- c. utilização de material reciclado em camada de leito do pavimento para melhoria das características da fundação, situação onde se aconselha o uso de material reciclado apenas em camada de sub-base, não se recomendando a aplicação de material reciclado em três camadas seguidas;
- d. durabilidade da estrutura de pavimento, nomeadamente em camada não revestida.

Em seguida mostra-se como se procedeu ao dimensionamento, tomando como exemplo o caso A: classe de fundação F2 e classe de tráfego T7a. A estrutura de pavimento proposta, após consulta do Quadro 4.7, foi de 5 cm de camada betuminosa em BD (betão betuminoso em camada de desgaste), AC 14 surf 35/50, 20 cm de camada de base e 20 cm de camada de sub-base, ambas constituídas pelos agregados em estudo: BBM, COMP e ABGE.

Foram calculadas as extensões por tração ( $e_t$ ), número admissível de eixos padrão (80 kN) por ação da tração ( $N_{80}^{adm}_t$ ), dano por fadiga ao final de 10 anos, extensões por tração ( $e_c$ ), número admissível de eixos padrão (80 kN) por ação da compressão ( $N_{80}^{adm}_c$ ), dano por deformação permanente ao final de 10 anos, e vida útil do pavimento até à ruína, conforme Quadro 4.8.


Para uma classe de tráfego T7a, o número acumulado de eixos padrão dimensionado para 10 anos é de  $0,2 \times 10^6$ . Os valores apresentados reportam-se à cidade do Porto porque é a cidade que apresenta os valores mais condicionantes.

No Anexo VII podem consultar-se os valores de vida útil relativos aos casos considerados, resultado da análise das extensões provenientes da aplicação BISAR.

Pelo Quadro 4.8 conclui-se que a estrutura de pavimento escolhida responde de forma positiva às condições impostas, à exceção do trecho constituído por base e sub-base em BBM, que não cumpre o período de 10 anos previstos. Esta estrutura de pavimento (A3) foi alvo de análise posterior.

Foi realizada esta análise para cada combinação de classe de tráfego e classe de fundação indicadas, para as cidade de Beja, Lisboa, Coimbra e Porto. Este estudo permitiu uma macroanálise da influência do clima na ruína do pavimento. Para estruturas com camada de betuminoso mais espessa a tendência é assemelharem-se a um comportamento de pavimento rígido, onde as camadas superficiais são mais solicitadas. Neste caso, o módulo de deformabilidade das camadas tem grande influência e entrará em ruína no local com maior temperatura, Beja. Nas estruturas testadas com 5 cm de betuminoso verifica-se o caso oposto, o que leva a um cenário mais desfavorável no Porto, como exemplo acima (caso A).

Quadro 4.8 – Valores de extensões e deformação para o caso A (F2 e T7a).

Identif.	Repres. gráfica (cm)	Acções para Porto				
		tipo	A 1	A 2	A 3	A 4
A F2 / T7a		base	ABGE	ABGE	BBM	COMP
		sub-base	BBM	COMP	BBM	COMP
		$e_t (\times 10^{-6})$	324	287	379	304
		$N_{80}^{adm}_t (\times 10^6)$	0,23	0,42	0,11	0,32
		Dano por fadiga a 10 anos (%)	<b>87</b>	<b>47</b>	<b>190</b>	<b>63</b>
		$e_c (\times 10^{-6})$	670	636	712	650
		$N_{80}^{adm}_c (\times 10^6)$	0,97	1,19	0,76	1,09
		Dano por def. permanente a 10 anos (%)	21	17	26	18
		Vida útil (anos)	11	19	5	15

Foram avaliadas outras opções além das equacionadas anteriormente. Estas estruturas foram uma vez mais baseadas nas estruturas presentes nas orientações portuguesa e espanhola e tidas como comuns no universo do projetista e concessionário da obra. A proposta de alteração prende-se com dois factos distintos e aborda dois caminhos possíveis:

1. quando se obtém um período de vida útil superior ao expetável, procura-se uma estrutura com camadas menos espessas e proporcionalmente mais económicas (aplica-se às estruturas com 15 ou mais anos);
2. caso se trate de uma estrutura cujo período de vida útil seja inferior a 10 anos, tentar-se-á aplicar uma nova estrutura, optando quer por aumentar a espessura das camadas granulares quer por reforçar a camada betuminosa, o que se traduz num menor impacte do tráfego nas camadas inferiores.

De um modo geral, conseguem-se alcançar estruturas que respondam ao proposto, para um período de vida de 10 anos, utilizando essencialmente materiais RCD.

Uma das exceções foi já identificada no exemplo anterior (caso A). Prevê-se que o trecho constituído por camada de base e sub-base em BBM dure apenas 5 anos. Portanto deve intervir-se de forma a prolongar a vida útil do pavimento constituído por este material. Optou-se pela utilização de um pavimento com maior espessura de camada betuminosa: 5 cm de AC 14 surf (BD) em camada de desgaste e 5 cm de AC 20 bin (MBD) em camada de base betuminosa. A análise a esta nova estrutura mostra que, para um período de 10 anos, os valores de dano relativos à deformação por fadiga são inferiores e que a solução proposta garante a qualidade estrutural do pavimento.

No decorrer da análise dos diferentes trechos verificou-se que a estrutura resultante da combinação de fundação F3 e de tráfego da classe T7a (25 veíc pesados/dia) apresenta um período de vida útil muito elevado. Com base neste facto optou-se por estudar duas novas soluções: (a) estruturas com camada superficial em ABGE não revestida; (b) estruturas constituídas por agregado reciclado em camada granular e revestimento superficial ao invés de uma camada betuminosa. O revestimento simples é a estrutura mais económica, adapta-se bem a suportes homogéneos e suporta tráfegos reduzidos ( $TMDA_p < 300$  veíc pes/dia) embora não resista a esforços tangenciais elevados (Branco, et al., 2006). Este revestimento é uma forma de dar coesão às camadas granulares e protegê-las da degradação à superfície.

Uma visão global dos diferentes trechos estudados, condicionados pelas classes de fundação e tráfego impostas, mostram que a fundação é o fator preponderante na escolha da estrutura de pavimento.

A classe de tráfego tem impacte na estrutura, uma vez que se constata que um maior tráfego pesado obrigará a estrutura a responder à maior solicitação. No entanto, o fator que transmite maior influência no estudo efetuado é a fundação. A classe de fundação F3 (100 MPa), com módulo de deformabilidade mais elevado que a classe F2 (60 MPa) permite às camadas granulares acima suportarem uma carga mais elevada. No caso de estruturas com fundação F3 verifica-se que a rutura do pavimento se dá essencialmente por fadiga na base das camadas betuminosas; o dano por deformação permanente, no topo do solo de fundação, para o período de dimensionamento é muito inferior ao dano provocado pela fadiga para o mesmo período.

#### Passo 4: Utilização da aplicação DARWin-ME


O método empírico-mecanicista integra um conjunto de dados e estudos que caracterizam o modelo de resposta do pavimento, de acordo com as suas características (materiais e fundação) e fatores externos, nomeadamente condições climáticas e tráfego. Este modelo permite prever a evolução das degradações do pavimento no período de serviço para a qual a infraestrutura é dimensionada. Esta abordagem complementa a informação resultante dos cálculos realizados pelo método da Shell, em fase de dimensionamento, relativa às degradações que podem surgir durante o período de vida útil do pavimento.

A aplicação DARWin-ME, que acompanha o método empírico-mecanicista MEPDG, apresenta-se como uma aplicação *user-friendly*, com *inputs* muito detalhados sobre a informação necessária à análise das estruturas de pavimento. Constata-se que alguma dessa informação não só não é habitual ser considerada no dimensionamento de pavimentos em Portugal (ao nível dos critérios de dimensionamento), como também não existe disponível na formatação requerida pela aplicação, como é o caso das condições climáticas e o das cargas de tráfego pesado.

Esta aplicação emite relatórios completos constituídos por: (a) dados resumo de *input* do projeto (Figura 4.2) para uma rápida identificação do mesmo; (b) dados de *output* do projeto (Figura 4.3), no qual inclui um quadro-resumo dos valores das degradações para pavimentos flexíveis e para o período de vida indicado e evolução das quatro primeiras degradações em forma de gráfico.

Design Inputs					
Design Life:	10 years	Base construction:	May, 2016	Climate Data	41.23, -8.68
Design Type:	Flexible Pavement	Pavement construction:	June, 2017	Sources (Lat/Lon)	
		Traffic opening:	September, 2017		

Design Structure				Traffic	
	Layer type	Material Type	Thickness(mm):	Volumetric at Construction:	
	Flexible	AC 14 surf 35/50	50.0	Effective binder content (%)	12.0
	NonStabilized	70% ABGE + 30% MBF	200.0	Air voids (%)	4.0
	NonStabilized	70% ABGE + 30% MBF	200.0		
	Subgrade	F2	Semi-infinite		

Age (year)	Heavy Trucks (cumulative)
2017 (initial)	167
2022 (5 years)	158,592
2027 (10 years)	332,432

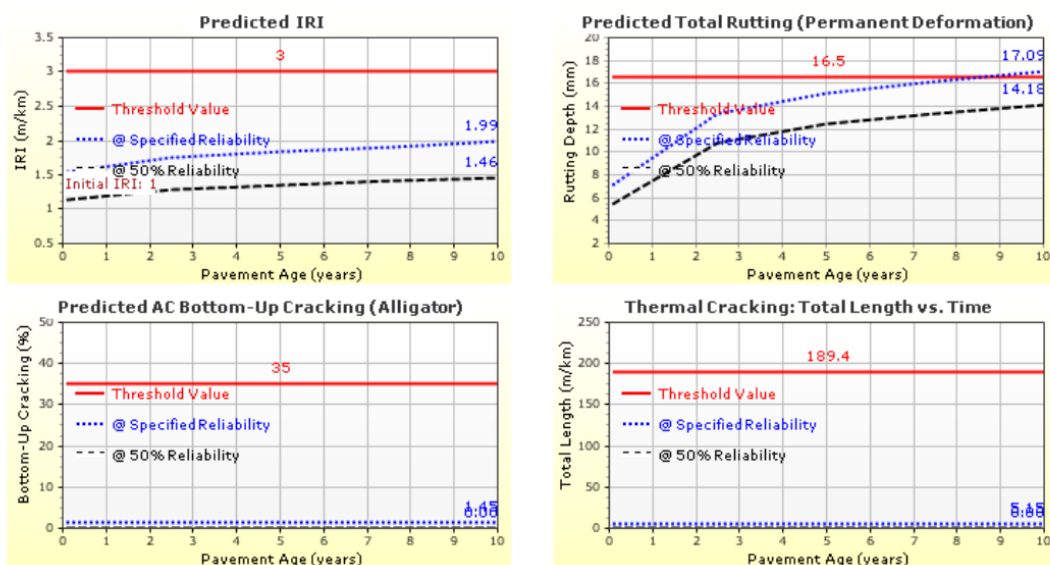
Figura 4.2 – Relatório DARWin-ME: dados de resumo de *input*.

## Design Outputs

### Distress Prediction Summary

Distress Type	Distress @ Specified Reliability		Reliability (%)		Criterion Satisfied?
	Target	Predicted	Target	Achieved	
Terminal IRI (m/km)	3.00	1.99	90.00	99.99	Pass
Permanent deformation - total pavement (mm)	16.50	17.09	90.00	84.75	Fail
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	35.00	1.45	90.00	100.00	Pass
AC thermal cracking (m/km)	189.40	5.15	90.00	100.00	Pass
AC top-down fatigue cracking (m/km)	378.80	56.24	90.00	100.00	Pass
Permanent deformation - AC only (mm)	6.00	2.44	90.00	100.00	Pass

### Distress Charts



Legenda das degradações apresentadas no quadro (por ordem): IRI (rugosidade), deformação permanente, pele de crocodilo (fendilhamento por fadiga *bottom-up*), fendilhamento transversal (térmico), fendilhamento longitudinal (fendilhamento por fadiga *top-down*) e deformação total nas camadas betuminosas.

Figura 4.3 – Relatório DARWin-ME: dados de resumo de *output*.

As estruturas de pavimento com aplicação dos materiais reciclados em pavimentos rodoviários foram analisados na aplicação DARWin-ME (resultados apresentados posteriormente).

Durante o processo de análise dos pavimentos na aplicação DARWin-ME procedeu-se a uma vasta recolha de informação. Os três níveis de *input* permitiram que fossem considerados: valores conhecidos, nomeadamente parâmetros que serviram de base à análise efetuada, como espessuras de camadas ou (TMDA)<sub>p</sub>; valores estimados, como teor em ligante ou porosidade, estimados a partir do intervalo definido em CETO, entre outros; e valores por omissão (valores recomendados pré preenchidos pela aplicação) para os campos cuja informação não estava disponível, de entre os quais desvio padrão da linha média do pneu ou características térmicas dos materiais betuminosos.

A aplicação DARWin-ME permitiu constatar que nem sempre todas as condições são possíveis de modelar: (a) para a camada de desgaste do tipo AC 20 surf 35/50, comum em Portugal, houve a necessidade de considerar para a penetração do ligante betuminoso a classe 40-50;

(b) como a aplicação só aceita pavimentos flexíveis ou rígidos, não foi possível considerar os pavimentos sem revestimento. Considerou-se a situação teórica aproximada de se ter uma espessura de camada betuminosa mínima de 2,5 cm.

Uma das preocupações no dimensionamento das estruturas de pavimento foi garantir que na utilização de ambas as metodologias, Shell e MEPDG, a abordagem ao tráfego fosse semelhante, uma vez estas metodologias consideram este parâmetro de modo diferente. Desta forma, foi estudado o fator de agressividade para garantir que o número acumulado de eixos padrão equivalente fosse o mesmo. Verificou-se uma discrepância de valores entre o fator de agressividade calculado para o MEPDG e aquele que é apresentado no MACOPAV para uma classe de tráfego T6 e utilizado no método da Shell. Optou-se por corrigir o valor de  $(TMDA)_p$ , de forma ponderada (conforme explicado no capítulo 4.3), para assegurar a igual influência do tráfego nos resultados, para as duas distribuições de tráfego (TTC 12 e TTC 14).

Os resultados da aplicação DARWin-ME foram estabelecidos para os seguintes critérios de projeto: IRI (3 m/km), deformação total (16,5 mm) e pele de crocodilo (35 %), e grau de confiança de 90 %. Para estes critérios, os resultados mostram que, aproximadamente, 80 % das estruturas estudadas atinge o período de vida útil proposto.

## 4.6 Resultados utilização da aplicação DARWin-ME

Pretendeu-se comparar os resultados de deformação obtidos pelo método da Shell, abordagem corrente em Portugal, com recurso à aplicação BISAR, e os resultados da metodologia MEPDG, recorrendo à aplicação DARWin-ME.

Os resultados detalhados da análise às estruturas de pavimento realizadas na aplicação DARWin-ME podem ser consultados no Anexo VIII.

### a. Deformação total

A deformação total foi a única degradação estudada para a qual o critério de projeto definido na metodologia MEPDG foi ultrapassado. Sete das trinta e duas estruturas de pavimento consideradas como válidas pelo método da Shell ultrapassaram o valor limite definido para deformação total na aplicação DARWin-ME (16,5 mm para um grau de confiança de 90 %) . No entanto, não se identificou qualquer correlação que caracterizasse esta diferença.

A evolução desta degradação é semelhante em todas as estruturas de pavimento. Como se pode observar na Figura 4.3, existem duas fases distintas no comportamento da deformação total. O crescimento acentuado desta degradação até aos 2,5 anos seguido de um crescimento mais suave até ao período de projeto proposto. No gráfico identifica-se ainda a quebra de declive aos 5 anos, não é marcante mas consegue concluir-se que a aplicação incrementa a evolução das degradações por períodos específicos.

Este comportamento é replicado nas estruturas de pavimento estudadas para um período de vida de 20 anos. Neste caso, verifica-se que existe um período inicial mais alargado, de 5 anos, no qual se observa a aceleração da evolução da degradação no pavimento e depois um período com valor de gradiente mais baixo até ao fim do período de projeto considerado. Face a estes resultados prevê-se que a aplicação implemente o mesmo comportamento da evolução da degradação aos projetos, ajustando-o ao período de dimensionamento considerado.

Para avaliar as metodologias MEPDG e Shell compararam-se os valores de deformação total (mm) e dano à deformação permanente (%), com utilização das aplicações DARWin-ME e do BISAR, respetivamente, no âmbito do estudo efetuado às estruturas de pavimento para o período de dimensionamento de 10 anos e 20 anos. Verificou-se que não é possível inferir uma

correlação estatisticamente relevante entre os resultados. Alguns grupos, devido às suas características comuns, como por exemplo estruturas com camada de betuminoso e classe de fundação F2, tendem a formar *clusters* embora não se consiga aplicar uma linha de tendência entre deformações.

b. Pele de crocodilo

Os valores obtidos para esta degradação do pavimento são muito baixos (face à área máxima de 35% considerada para um grau de confiança de 90%). Todos os pavimentos experimentais analisados mostram que, para o período considerado, não irão surgir áreas relevantes de pele de crocodilo no pavimento.

A evolução desta degradação também é muito pequena. A linha dos gráficos (conforme exemplo da Figura 4.3) que caracterizam a evolução da pele de crocodilo nos pavimentos ao longo do tempo apresenta-se quase horizontal. Uma vez que a pele de crocodilo é calculada através de uma função de transferência que propaga, pela ação de cargas no pavimento, o valor inicial de área afetada da camada betuminosa conclui-se que a carga no pavimento não está a ter efeito na propagação da pele de crocodilo.

Esta degradação é avaliada indiretamente pelo dimensionamento de pavimentos corrente em Portugal com recurso ao método da Shell. Este método permite calcular a extensão de tração máxima admissível na base das camadas betuminosas e, conseqüentemente, obter o dano por fadiga a que o pavimento vai estar sujeito no final do período para o qual é dimensionado.

Uma vez que a quase totalidade das estruturas de pavimento dimensionadas pelo método da Shell apresentou como condicionante o dano por fadiga não se conseguem explicar os resultados (as estruturas com camadas granulares não revestidas não apresentam esta condicionante uma vez que não têm camadas betuminosas).

c. IRI

Os valores de IRI calculados para os pavimentos são muito inferiores ao valor limite imposto para o período de projeto (3 m/km para um grau de confiança de 90 %).

O índice IRI considera, no seu cálculo, fatores como profundidade do sulco formado pela deformação total nas camadas, fendilhamento longitudinal ou pele de crocodilo, os dois últimos com menor relevância no cálculo. O facto de algumas das estruturas de pavimento apresentarem valores elevados de deformação total não conduz a um IRI acima do valor limite. As degradações como fendilhamento longitudinal e pele de crocodilo não variam de forma significativa, ou seja, não se refletem no cálculo do IRI.

O IRI não é passível de ser avaliado pelo dimensionamento com recurso ao método da Shell.

## 4.7 Catálogo de estruturas de pavimento com RCD

Face aos resultados apresentados, na sequência das conclusões já obtidas do projeto SUPREMA, conclui-se que os materiais reciclados aqui estudados – BBM e COMP – são uma opção válida para rodovias com tráfego relativamente baixo e classes de fundação F2 e F3.

Neste sentido foram elaborados diferentes catálogos (quadros-resumo) de fácil consulta.

As estruturas de pavimento propostas respondem às situações de ocorrência provável em Portugal e fixam-se como catálogos de pré-dimensionamento para uma fase de conceção, ficando o projetista ciente das estruturas passíveis de utilização para os casos apresentados. No entanto, a consulta dos catálogos não invalida a necessidade de confirmar a viabilidade da

estrutura de acordo com as características do projeto rodoviário em curso, através do respetivo dimensionamento pelo método considerado mais adequado.

Estes quadros não consideram a combinação dos materiais uma vez que não se mostra realista obter materiais RCD de tipo diferente em quantidade suficiente para uma mesma obra.

Para consultar os catálogos deve proceder-se conforme é ilustrado na Figura 4.4.

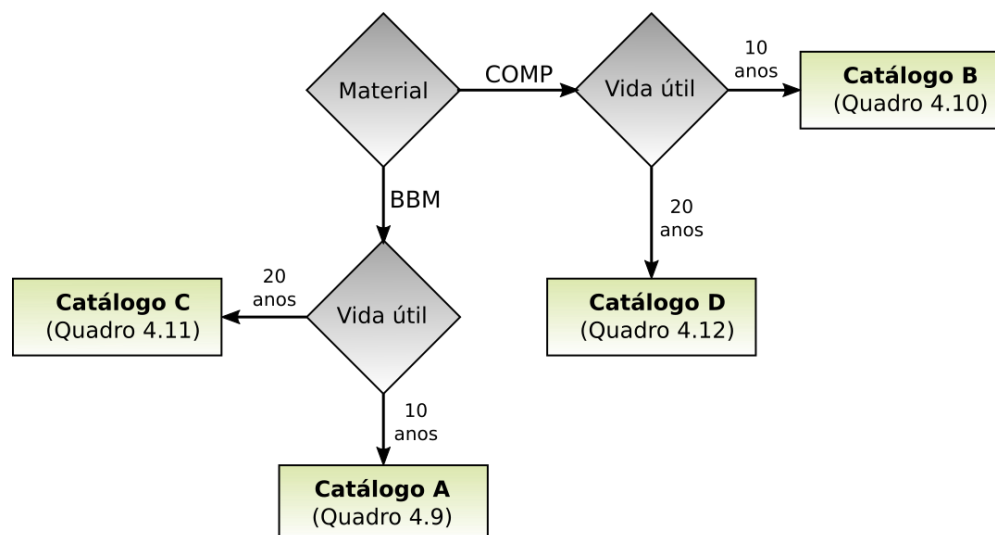


Figura 4.4 – Fluxograma de decisão para consulta dos catálogos.

Realça-se que no catálogo português que serviu de orientação à escolha das estruturas de pavimento (MACOPAV) o período de vida útil das estruturas é de 20 anos, embora, nesta dissertação se tenha optado por um período de vida mais curto: 10 anos. Este facto justifica-se essencialmente por: utilizam-se materiais cujas características e limites temporais não são totalmente conhecidos a longo prazo; e existe dificuldade de prever o tráfego para períodos longos.

No Quadro 4.9 e no Quadro 4.10 privilegia-se a utilização dos materiais reciclados quer em camada de base quer de sub-base, para um período de vida útil de 10 anos.

No entanto, face a alguns resultados do dimensionamento com recurso ao método da Shell, considerou-se que nalguns casos é viável estender os catálogos para um período de vida de 20 anos sem recorrer a estruturas mais complexas. No Quadro 4.11 e no Quadro 4.12 apresentam-se as estruturas de pavimento com período de vida útil de 20 anos, constituídas por BBM e COMP, respetivamente. Estes quadros apresentam apenas estruturas-tipo para fundação F3 uma vez que para uma fundação F2, com características inferiores, não se satisfazem os critérios de dimensionamento para um período de 20 anos, com estas estruturas.

O projeto de pavimentação deve garantir as condições que serão encontradas na obra. É necessário avaliar as características dos materiais e comparar a quantidade de material reciclado disponível e a dimensão da obra para assegurar a necessária estrutura de pavimento. No caso de existir pouco material face à necessidade da obra deve optar-se por aplicar camada em ABGE. Os materiais utilizados nas estruturas de pavimento estão de acordo com os requisitos definidos no caderno de encargos CETO (EP, 2014).

O material natural apresenta melhores características que os RCD; é, portanto, previsível um melhor desempenho das camadas granulares nas estruturas com camada de base em ABGE. Na análise efetuada às estruturas de pavimento consegue reduzir-se, em vários casos, a



espessura das camadas granulares quando se recorre ao ABGE em camada de base (em vez de RCD), considerando o mesmo período de dimensionamento de 10 anos.

Um dos fatores utilizado para análise das estruturas de pavimento foi a temperatura das cidades de Beja, Lisboa, Coimbra e Porto. Destes resultados segregou-se o ponto do país onde o período de vida útil era o inferior, por ser o mais condicionante. Este facto é suportado pela pequena área e pouca diversidade do país, quer em termos de tráfego quer de clima, e pela necessidade de apresentar catálogos nacionais representativos do panorama nacional.

No Quadro 4.9 e Quadro 4.10 apresentam-se as estruturas de pavimento que asseguram a estabilidade e adequabilidade do pavimento ao tráfego esperado, para um período de 10 anos, resultado da otimização da análise efetuada nesta dissertação. São apresentadas até um máximo de 2 estruturas de pavimento para a combinação: tipo de fundação (F2 e F3) - classe de tráfego (T6, T7a e T7b).

A consulta dos catálogos deve ser feita da seguinte forma: (a) seguir o fluxograma presente na Figura 4.4; (b) procurar no catálogo indicado o tipo de fundação na coluna da esquerda; (c) procurar a classe de tráfego na linha do topo; (d) cruzar linha e coluna correspondentes e identificar as estruturas propostas; (e) escolher, de acordo com as condições de projeto, a estrutura.

Face ao bom desempenho verificado pelas estruturas de pavimento propostas para o tipo de fundação F3 e classe de tráfego T7a foi ainda estudada a possibilidade de aplicação de RCD em camadas granulares em estruturas de pavimento com camada não revestida. As soluções apresentadas devem, no entanto, ser validadas no decorrer do dimensionamento do projeto face às condicionantes da obra.

Branco, et al (2006) afirma que as estradas não pavimentadas podem suportar o tráfego reduzido e lento com êxito em tempo seco, e por vezes em tempo chuvoso; todavia, os solos resistem mal às ações tangenciais dos pneus, perdem resistência com o aumento do teor em água e são erodíveis. Devido à atuação das condições climáticas e das cargas de tráfego vão ocorrendo na superfície de rolamento, por vezes num curto período de tempo, deformações e degradações que afetam as condições de circulação e obrigam a ações de manutenção frequentes. Assegurar que a superfície de rolamento se mantenha com boa qualidade por períodos longos implica o recurso a camadas de materiais mais resistentes, dispostas sobre os solos (Branco, et al., 2006)

Considera-se, portanto, que as estruturas de pavimento com camada não revestida não devem ser aplicadas em:

- locais onde se preveja a existência de ações tangenciais elevadas, nomeadamente, parques de estacionamento e de manobras de veículos;
- infraestruturas com inclinação de rasante superior a 4%, para garantia das condições de segurança dos veículos;
- zonas aluvionares sujeitas a inundações e outros locais onde se preveja existir deficiente drenagem de água.

A inclinação da rasante é particularmente importante, pretende garantir-se que o veículo tem tração nas subidas e consegue efetuar uma travagem nas descidas sem colocar em causa a segurança do utilizador. Uma vez que o pavimento está sujeito a condições de tráfego e clima adverso, muitas vezes com ações negativas majoradas pela deficiente rede de drenagem de águas, propõe-se a utilização de:



- revestimento superficial duplo em infraestruturas que apresentem rasante com inclinação entre 4% e 10%;
- betão betuminoso em camada de desgaste, com 4 cm em AC 14 surf 35/50 para inclinações superiores a 10%.

As estruturas com camada não revestida em agregado reciclado (BBM ou COMP) devem seguir os pressupostos indicados, aos quais acresce e se sobrepõe que para inclinações inferiores a 4% a estrutura deve ter sempre revestimento superficial.

Aconselha-se ainda o projetista a utilizar estruturas com camada de base em ABGE no caso de utilização de material reciclado em leito do pavimento. Confinam-se a sua utilização a 2 camadas de material reciclado face à incerteza de reação do material em espessuras superiores a 40 cm e evolução do comportamento do agregado reciclado.

Quando as condições em obra permitem a aplicação de duas ou mais estruturas de pavimento propostas cabe ao projetista avaliar qual a solução mais viável. Esta dissertação não inclui uma análise económica, recorrendo por exemplo a ferramentas de LCCA (*life cycle cost analysis*). Não é fácil conhecer custos e modelos de comportamento que justifiquem uma análise económica robusta.

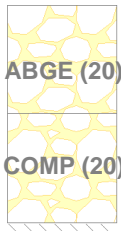
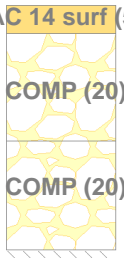
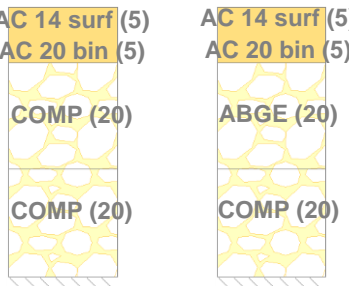

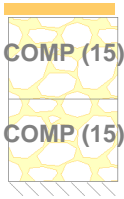
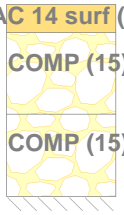
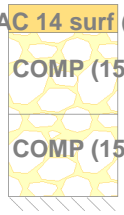
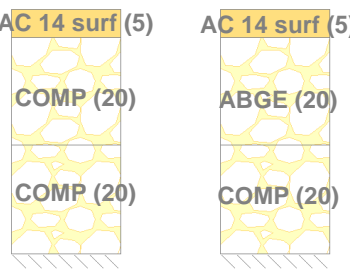
Quadro 4.9 – Catálogo A: Estruturas com camadas granulares em BBM e ABGE e período de vida de 10 anos.

Tráfego Fundação	T7a* (camada não revestida)	T7a	T7b	T6
F2	H	A	B	C
F3	G	D	E	F

\* Consultar recomendações de aplicação presentes neste sub-capítulo.

(espessura das camadas em cm)

Quadro 4.10 – Catálogo B: Estruturas com camadas granulares em COMP e ABGE e período de vida de 10 anos.

Tráfego Fundação	T7a* (camada não revestida)	T7a	T7b	T6
F2	H 	A 	B 	C 
F3	G 	D 	E 	F 

\* Consultar recomendações de aplicação presentes neste sub-capítulo.

(espessura das camadas em cm)

Proposta de estruturas-tipo de pavimentos com RCD em camadas não ligadas

Quadro 4.11 – Catálogo C: Estruturas com camadas granulares em BBM e ABGE e período de vida de 20 anos.

Tráfego Fundação	T7a (camada não revestida)	T7a	T7b	T6
	G	D	E	F
F3				

(espessura das camadas em cm)

Quadro 4.12 - Catálogo D: Estruturas com camadas granulares por COMP e ABGE e período de vida de 20 anos.

Tráfego Fundação	T7a (camada não revestida)	T7a	T7b	T6
	G	D	E	F
F3				

(espessura das camadas em cm)

## 5 Conclusão

### 5.1 Síntese do trabalho

O desenvolvimento desta dissertação consistiu sobretudo em:

- analisar os materiais usados no projeto SUPREMA e aprofundar o campo de aplicação dos mesmos em pavimentos rodoviários;
- propor estruturas-tipo de pavimentos com resíduos provenientes de construção e demolição (RCD) em camadas de base e sub-base, organizando catálogo de utilização de acordo com o tipo de material, tipo de fundação e classe de tráfego;
- estudar a evolução de algumas das principais degradações de pavimentos com recurso à metodologia empírico-mecanicista, através da aplicação DARWin-ME.

Para a análise das estruturas-tipo de pavimentos utilizaram-se os dados provenientes do projeto SUPREMA, no qual os materiais MBB, BBM e COMP foram avaliados quanto à sua constituição, propriedades geométricas, químicas e comportamento mecânico. Com estes dados foi possível classificar os materiais, de acordo com as especificações LNEC (LNEC, 2009a) (LNEC, 2009b), a proposta de alteração das especificações LNEC para utilização de RCD em vias municipais e rurais (Rodrigues, 2013) e o guia espanhol (GERD, 2011) e conhecer o campo de aplicação deste tipo de materiais em pavimentos rodoviários.

Posteriormente, e com base em estruturas definidas no guia espanhol GEAR (GERD, 2011) e MACOPAV (JAE, 1995), foram selecionadas estruturas de pavimento para análise. Esta análise, com recurso ao método de dimensionamento da Shell, teve várias iterações e só terminou quando se encontraram estruturas que respondiam às condições impostas para um período de 10 anos. Foram construídos 4 catálogos nos quais se propõem estruturas com recurso à aplicação de RCD e que se espera que sejam úteis à consulta por parte dos projetistas em Portugal em termos de conceção de soluções.

Realizou-se, ainda, uma análise da evolução das degradações dos pavimentos através da metodologia MEPDG, com recurso à aplicação DARWin-ME.

Para esta análise começou-se por realizar uma extensa revisão bibliográfica que permitisse não só conhecer todos os conceitos associados à metodologia empírico-mecanicista, como poder utilizar a aplicação DARWin-ME que dá corpo a esta metodologia. Foram identificados os *inputs* desta aplicação – materiais, tráfego e condições climáticas – e as formas de cálculo das degradações, *output* da mesma.

Estabeleceu-se uma comparação entre as condições climáticas de Portugal e dos estados dos E.U.A., onde a metodologia já foi alvo de adaptação local. Foi ainda estudado o fator de agressividade do tráfego para que se pudesse estabelecer uma forma de comparação entre as duas metodologias, Shell e MEPDG, que abordam a questão do tráfego de forma diferente e nos quais se pretende ter o mesmo impacto do tráfego no pavimento.

Por fim, as estruturas de pavimento, validadas e presentes nos catálogos, foram analisadas de acordo com a metodologia empírico-mecanicista e avaliada a evolução do IRI, deformação total e pele de crocodilo nestes pavimentos.

## 5.2 Principais conclusões

No projeto de uma estrada deve optar-se por um pavimento tecnicamente exequível e que acarrete os maiores benefícios económicos e ambientais. Os RCD são materiais viáveis, asseguram a qualidade estrutural do pavimento e são uma opção de escolha válida para o projeto rodoviário.

No presente estudo publicam-se 4 catálogos, de fácil consulta, organizados de acordo com o tipo de material que se pretende utilizar e período de projeto:

- catálogo A: estruturas com camada de base em ABGE ou BBM e sub-base em BBM e período de vida útil de 10 anos;
- catálogo B: estruturas com camada de base em ABGE ou COMP e sub-base em COMP e período de vida útil de 10 anos;
- catálogo C: estruturas com camada de base em ABGE ou BBM e sub-base em BBM e período de vida útil de 20 anos;
- catálogo D: estruturas com camada de base em ABGE ou COMP e sub-base em COMP e período de vida útil de 20 anos.

Estes catálogos apresentam soluções estruturais-tipo para pavimentos rodoviários com tráfego baixo (classes de tráfego T7 e T6) e classes de fundação F2 e F3. Os catálogos incorporam estruturas com camada de base em ABGE para poder responder à falta de material reciclado em obra. Caso a quantidade seja suficiente cabe ao projetista avaliar a solução mais viável de acordo com as restantes condições previstas em obra. Nos catálogos C e D privilegiou-se a utilização de material reciclado para o período de análise de 20 anos.

No caso de utilização de material reciclado em leito do pavimento propõe-se a utilização de estruturas-tipo com camada de base em ABGE. Confinam-se assim a utilização de RCD a apenas duas camadas: camadas de leito do pavimento e sub-base; ou camadas de sub-base e base. Para o caso de estruturas-tipo com camada traficada não revestida propõe-se a restrição ao uso das soluções, nomeadamente em locais sujeitos a ações tangenciais elevadas e inclinação da rasante superior a 4 %.

Estes catálogos foram obtidos pelo dimensionamento das diferentes estruturas de pavimento, pelo método da Shell. Estas estruturas, baseadas no desempenho dos trechos do projeto SUPREMA e inspiradas nas estruturas definidas no MACOPAV (JAE, 1995) e no guia espanhol (GERD, 2011), foram iterativamente analisadas de modo a otimizar as soluções apresentadas, recorrendo a espessuras correntes no projeto e construção em Portugal.

Como esperado, as estruturas com base em ABGE conseguiram responder às condições estruturais impostas com espessuras de camada mais reduzidas. No caso em que a espessura das camadas é igual, a estrutura na qual se utiliza ABGE apresenta um período de vida útil superior à das estruturas com material reciclado em igual camada.

O material reciclado MBB foi, em conjunto com os materiais BBM e COMP, um dos materiais estudados no âmbito do projeto SUPREMA. No entanto, a classificação do material, com base nas especificações LNEC mostra que o mesmo não se encaixa nos intervalos considerados para utilização em base ou sub-base de pavimentos rodoviários.

A proposta de alteração às especificações LNEC considera intervalos limite mais alargados, o que se traduz num campo de aplicação mais abrangente face ao previsto nas especificações LNEC E 473 e LNEC E 474. O guia espanhol (GERD, 2011) também apresenta um espetro de utilização mais alargado, admite mais camadas e/ou mais tráfego. No entanto estas diferenças

não são muito díspares das especificações portuguesas. Foram consideradas todas as abordagens e optou-se por analisar as estruturas de pavimento para camada de base e de sub-base.

As estruturas de pavimento foram alvo de análise na aplicação DARWin-ME. Esta aplicação põe em prática a metodologia empírico-mecanicista desenvolvida pela AASHTO que permite prever respostas críticas do pavimento que são também função do tráfego e condições climáticas.

As estruturas de pavimento foram avaliados de acordo com critérios de IRI (3 m/km), deformação total (16,5 mm) e pele de crocodilo (35 %) para um grau de confiança de 90 %.

Em suma, no processo de análise dos trechos experimentais dos pavimentos verificou-se que os dados resultantes da aplicação DARWin-ME diferem dos do método da Shell, no qual se recorreu à aplicação BISAR.

Apenas 80 % das estruturas de pavimento, já validadas para os catálogos pelo método corrente em Portugal, cumpriram os limites impostos. Verificou-se que a deformação total nas camadas betuminosas e granulares foi a única causa condicionante nos pavimentos. A sua evolução tem duas fases distintas: um crescimento mais acentuado nos primeiros anos de vida do pavimento e uma segunda fase menos acentuada, ambos com comportamento quase linear.

O Guia de projeto da AASHTO (2008) identifica as funções de cálculo utilizadas para a previsão de desempenho do pavimento e compara-as, com base no processo de calibração global, com a base de dados recolhida no estudo LTPP. Os resultados mostram que os modelos, para esta calibração, não conseguem traduzir os resultados reais. Os valores de  $R^2$  apresentados para deformação total, pele de crocodilo e IRI são de 0,577, 0,275 e 0,56, respetivamente.

A utilização da aplicação prevê a sua adaptação às condições locais quer pela inserção de dados com o máximo detalhe possível, quer pela adequação dos modelos que refletem as degradações do pavimento. Esta adequação, que se espera trazer um maior impacto na adaptação da aplicação às condições portuguesas, acarreta maior desenvolvimento e recursos pelo que não foi abordada no âmbito desta dissertação.

Para estabelecer um ponto de partida nesta calibração, compararam-se as condições climáticas dos vários estados dos E.U.A. às condições climáticas portuguesas. Concluiu-se que o estado da Califórnia é o estado que mais se assemelha a Portugal, seguido do estado Carolina do Sul.

### 5.3 Desenvolvimentos futuros

Tendo como objetivo o suporte técnico-científico da aplicação de agregados reciclados em pavimentos rodoviários que, apesar de já aplicados, necessitam ainda de uma validação, propõe-se que sejam:

- levados a cabo outros projetos semelhantes ao projeto SUPREMA que possam analisar as propriedades dos materiais reciclados e avaliar a viabilidade da sua aplicação em obra, uma vez que existem diversos tipos de materiais;
- estudados materiais com características ímpares que consigam responder a diferentes condições, nomeadamente, outros tipos de fundação ou classes de tráfego;

## Conclusão

- realizadas campanhas de aplicação dos materiais reciclados em obra e validados os resultados teóricos apresentados.

A reciclagem de materiais é palavra-chave na sustentabilidade e deve ser explorada no universo nacional. Espera-se que o catálogo desenvolvido no âmbito do presente estudo seja alvo de publicação e objeto de consulta generalizada por parte dos projetistas em Portugal.

A aplicação DARWin-ME resulta de uma metodologia de dimensionamento inovadora, que integra características de materiais, tráfego e condições climáticas e devolve informação sobre a evolução do desempenho do pavimento para o período de projeto considerado. Apesar da sua utilização estar disseminada pelos E.U.A., em Portugal é ainda desconhecida. Os resultados alcançados nesta dissertação mostram que é necessário:

- continuar o estudo da aplicação, nomeadamente para pavimentos novos rígidos e reabilitação de pavimentos, temas não abordados nesta dissertação;
- efetuar o estudo pormenorizado dos materiais, com recurso a outros ensaios, de forma a conseguir responder a todos os *inputs* considerados pela aplicação;
- proceder à recolha e integração de dados de tráfego e condições climáticas em Portugal para estabelecer bases de dados sólidas para os diversos pontos do país;
- realizar um projeto nacional de construção e monitorização das condições rodoviárias para recolha de dados, ao longo do tempo;
- promover a implementação local da metodologia empírico-mecanicista apresentada, abordando toda a informação recolhida e procedendo a análises estatísticas que consigam traduzir o desempenho do pavimento.

A implementação local da metodologia MEPDG só foi possível devido ao trabalho conjunto de todas as entidades locais e nacionais nos E.U.A.. Espera-se que o cruzamento de dados, a partilha e o trabalho em equipa possa, no futuro, permitir a implementação da metodologia empírico-mecanicista em Portugal.



## 6 Referências bibliográficas

- AASHTO, 1993. *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 2008. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*. Interim Edition ed. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Ahammed, M., Kass, S., Hilderman, S. & Tang, W., 2011. *MEPDG Implementation: Manitoba Experience*, Edmonton, Canada: Paper prepared for presentation at the Effects of Increased Loading on Pavements Session of the 2011 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- AI, 1982. *Research and Development of the Asphalt Institute Thickness Design Manual (MS-1)*. 9th edition ed. Lexington, USA: Asphalt Institute. Research Report 82-2.
- Almeida, A. M. M., 2015. *A Methodological Framework For Pavement Damage Estimation Considering Simulated Axle Load Spectra*, Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Tese de Doutoramento.
- Al-Omari, B. & Darter, M. I., 1992. *Relationships between IRI e PSR*, Illinois, USA: Springfield.
- Ângulo, S. C., Zordan, S. E. & John, V. M., 2007. *Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil*, São Paulo, Brasil: Departamento de Engenharia da Construção Civil da Escola Politécnica.
- APA, 2015. *Resíduos de Construção e Demolição*. [Online] Available at: <http://www.apambiente.pt> [Acedido em Fevereiro 2015].
- Arm, M., 2001. *Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field test*. New York, USA: Elsevier Science. Paper from Waste Management, Vol 21, No 3, pp 235-239.
- Aryes, M. J., 2002. *Unbound Material Rut Model Modification*, USA: Inter Team Technical Report for NCHRP 1-37A. Development of the 2002 Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.
- ASU, 2003. *Sensitivity Analysis for the Level 3 Thermal Cracking Model*, Arizona, USA: Inter Team Technical Report.
- Baptista, A., 1999. *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Aplicabilidade em Portugal de Métodos Existentes*, Coimbra: Dept. Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra. Dissertação de Mestrado.
- Bonnaure, F., Gravois, A. & Udron, J. A., 1980. *A New Method of Predicting the Fatigue Life of Bituminous Mixes*, St Paul, USA: Association of Asphalt Paving Technologists. Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologist, Vol 49, pp 499-529.
- Branco, F., Pereira, P. & Picado-Santos, L., 2006. *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Almedina.
- Buch, N., Chatti, K., Haider, S. W. & Manik, A., 2008. *Evaluation of the 1-37A Design Process for the New and Rehabilitated JPCP and HMA Pavements*, East Lansing, USA: Michigan State University.
- CAIT, 2006. *Pavement Resource Program Quarterly Progress Report (1st quarter)*, Rutgers, USA: Center for Advanced Infrastructure & Transportation.

## Referências bibliográficas

- Carey, W. N. & Irick, P. E., 1990. *The Pavement Serviceability-Performance Concept*, Washington DC, USA: Highway Research Board. Highway Research Bulletin No 250.
- Ceylan, H., Coree, B. & Gopalakrishnan, K., 2009. *Evaluation of the Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide for Implementation in Iowa*, Iowa, USA: Iowa State University. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, Vol 4, No 1, pp 5-12.
- Cordeiro, M. S., 2010. *Análise do tráfego de veículos pesados em Portugal para o cálculo do factor de agressividade*, Lisboa: IST - UTL. Dissertação de Mestrado.
- Correia, A. G., Neves, J. M. C. & Fonseca, P., 1997. *Caracterização mecânica "in situ" de camadas da fundação de pavimentos rodoviários*, Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia e Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico. Apresentação no 6º congresso nacional de geotecnia - A geotecnia nas infra-estruturas de transporte, energia e ambiente, pp 793-800.
- Daniel, J. S. & Chehab, G. R., 2008. *Use of RAP Mixtures in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*, Washington DC, USA: Paper prepared for publication and presentation at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Darter, M. I. & Barenberg, E. J., 1976. *Zero-Maintenance Pavements: Results of Field Studies on the Performance Requirments and Capabilities of Conventional Pavement*, Washington DC, USA: Federal Highway Administration. Report No. FHWA-RD-76-105.
- Darter, M. I., Titus-Glover, L. & Von Quintus, H. L., 2009. *Implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide in Utah: validation, calibration and development of the udot MEPDG user's guide*, Utah, USA: Department of Transportation. Research Division. UDOT Report No. UT-09.11.
- Domingos, M. J. D., 2009. *Patologia de Pavimentos Rodoviários Flexíveis em Ambiente Urbano*, Lisboa: IST - UTL. Dissertação de Mestrado.
- Dzotepe, G. & Ksaibati, K., 2010. *Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*, Wyoming, USA: University of Wyoming and Wyoming Technology Transfer Center, Report No. 10-225A.
- EP, 2014. *CETO: 14.03 Pavimentação - características dos materiais*, Portugal: Estradas de Portugal.
- Flintsch, G. W., Loulizi, A., Diefenderfer, S. D. & Diefenderfer, B. K., 2008. *Asphalt Materials Characterization in Support of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Implementation Efforts in Virginia*, Washington DC, USA: National Research Council. Paper prepared for publication and presentation at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Freire, A. C.; Neves, J. M.; Roque, A. J.; Martins, I. M.; Antunes, M. L.; Faria, G. R., 2012. *Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Pavimentos Rodoviários*, Lisboa: LNEC. Apresentação no XIII Congresso Nacional de Geotecnia.
- Freire, A. C.; Neves, J. M.; Roque, A. J.; Martins, I. M.; Antunes, M. L.; Faria, G. R., 2013a. *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas granulares de pavimentos rodoviários validada em trecho piloto*, Lisboa: LNEC. Apresentação no 7º Congresso Rodoviário Português.
- Freire, A. C.; Neves, J. M.; Roque, A. J.; Martins, I. M.; Antunes, M. L.; Faria, G. R., 2013b. *Suprema - Aplicação sustentável de resíduos de construção e demolição (RCD) em infra-estruturas rodoviárias*, Lisboa: LNEC. Relatório de progresso do projecto PTDC/ECM/100931/2008: relatório 159/2013 - DT/NIRA.

GERD, 2011. *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*, Espanha: Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. Proyectos de Desarrollo Experimental del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica - periodo 2008-2011.

GOV.UK, 2013. *Construction Sector Transparency Initiative (CoST)*, GOV.UK. [Online] Available at: <https://www.gov.uk/construction-sector-transparency-initiative-cost#the-process> [Acedido em Fevereiro 2015a].

GOV.UK, 2015. *Department for Transport, Government United Kingdom*. [Online] Available at: <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-transport> [Acedido em Fevereiro 2015b].

Haas, R., Meyer, F., Assaf, G. & Lee, H., 1987. *A comprehensive study of cold climate airport pavement cracking*, USA: Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 56, pp 198-245.

Hall, K. D., Byram, D., Xiao, D. X. & Wang, K. C., 2012. *Sensitivity Analysis of Climatic Influence on MEPDG Flexible Pavement Performance Predictions*, Washington DC, USA: Paper prepared for publication and presentation at the 91th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Hall, K. D., Xiau, D. X. & Wang, K. C. P., 2011. *Calibration of the MEPDG for Flexible Pavement Design in Arkansas*, Washington DC, USA: National Research Council. Paper prepared for publication and presentation at the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Hansen, K. R. & Copeland, A., 2012. *Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2012*, Lanham, USA: National Asphalt Pavement Association. Information Series 138.

Horvath, A., 2003. *Life-cycle environmental and economic assessment of using recycled materials for asphalt pavements*. Berkeley, USA: University of California.

IDRRIM, 2014. *Les Notes d'informations de l'IDRRIM, Institut des Routes, des Rues et des infrastructures pour la Mobilité*. [Online] Available at: <http://www.idrrim.com/publications/notes-information-idrrim.htm> [Acedido em Fevereiro 2015].

INCM, 2015. *Portaria n.o 209/2004, Diário da República electrónico*. [Online] Available at: <https://dre.pt/> [Acedido em Fevereiro 2015].

ITF, 2013. *Spending on Transport Infrastructure 1995-2011- Trends, Policies, Data*, Paris, França: International Transport Forum. OECD.

ITF, 2015. *International Transport Forum*. [Online] Available at: <http://www.internationaltransportforum.org/> [Acedido em Janeiro 2015].

JAE, 1995. *MACOPAV - Manual de Conceção de Pavimentos para a rede rodoviária nacional*, Lisboa: Junta Autónoma das Estradas.

Jiménez, J. R.; Ayuso, J.; Agrela, F.; López, M.; Galvín, A. P., 2012. *Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads*, Córdoba, Espanha: Elsevier. Paper prepared for publication in Resources, Conservation and Recycling Vol 58, pp 88-97.

Kaloush, K. E. & Witczak, M. W., 2000. *Development of a Permanent to Elastic Strain Ratio Model for Asphalt Mixtures*, USA: Inter Team Technical Report for NCHRP 1-37A. Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.

## Referências bibliográficas

- Kang, M. & Adams, T., 2008. *Local Calibration of the Fatigue Cracking Model in the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Madison, USA: University of Wisconsin. Paper prepared for publication and presentation at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Khanum, T., Mulandi, J. N. & Hossain, M., 2008. *Implementation of the 2002 AASHTO design guide for Pavement Structures in KD*. Final Report ed. Kansas, USA: Kansas Department of Transportation. University of Kansas. Report No. K-TRAN: KSU-04-4.
- Kim, S., Ceylan, H., Gopalakrishnan, K. & Smadi, O., 2010. *Use of Pavement Management Information System for Verification of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Performance Predictions*, Washington DC, USA: Transportation Research Record. Paper prepared for publication in Journal of the Transportation Research Board, No 2153, pp 30-39.
- Lage, I. M., Abella, F. M., Herrero, C. V. & Ordóñez, J. L. P., 2010. *Estimation of the annual production and composition of C&D Debris in Galicia (Spain)*, New York, USA: Elsevier. Paper prepared for publication in Journal of Waste Management, Vol 30, No 4, pp 636-645.
- Larson, G. & Dempsey, B. J., 1997. *Enhanced Integrated Climatic Model, version 2.0*, USA: Federal Highway Administration.
- Leahy, R. B., 1989. *Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete*, College Park, USA: University of Maryland. PhD Dissertation.
- Li, J., Preice, L. & Uihmeyer, J., 2009. *Calibration of Flexible Pavement in Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Washington State*, Washington DC, USA: Transportation Research Record. Paper prepared for publication in Journal of the Transportation Research Board, No 2095, pp 73-83.
- LNEC, 2009a. *E 473 - 2009: Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não-ligadas de pavimentos*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC, 2009b. *E 474 - 2009: Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camadas de leito de infra-estruturas de transporte*, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Lytton, L. R.; Urzan, J.; Fernando, E. G.; Roque, R.; Hiltunen, D.; Stoffels, S. M., 1993. *Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes*, Washington DC, USA: Strategic Highway Research Program. National Research Council. SHRP-A-357 Report.
- Magalhães, T. S.; Lemos, R. S.; Santos, K. O.; Silva, J. A.; Santos, A. B., 2010. *Gestão dos resíduos da construção civil*, Araruama, Brasil: Escola Politécnica Antónia Luiz Pedrosa.
- Mália, M. A. B., 2010. *Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição*, Lisboa: IST - UTL. Dissertação de Mestrado.
- Mellela, J.; Titus-Glover, L.; Darter, M. I.; Quintus, H. L. Von; Gotlif, A.; Stanley, M.; Sadasivam, S., 2009. *Guidelines for Implementing NCHRP 1-37A M-E Design Procedures in Ohio: Volume 1 - Summary of Findings, Implementation Plan, and Next Steps*, Champaign, USA: Applied Research Associates, Inc..
- MOPU, 2003. *Orden FOM/3460/2003*, Espanha: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- Muthadi, N. & Kim, Y., 2008. *Local Calibration of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Flexible Pavement Design*, Washington DC, USA: Transportation Research Record.

Paper prepared for publication in Journal of the Transportation Research Board, No 2087, pp 131-141.

NASA, 2014. *Climate Data Guide, NASA MERRA*. [Online] Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasa-merra> [Acedido em Outubro 2014].

NCHRP, 2004. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*, Champaign, USA: National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board of the National Research Council.

Padmini, A. K., Ramamurty, K. & Mathews, M. S., 2009. *Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete*, India: Elsevier. Paper prepared for publication in Construction and Building Materials, Vol 23, No 2, pp 829-836.

Paterson, W. D. O., 1989. *A Transferable Causal Model for Predicting Roughness Progression in Flexible Pavements*, Washington DC, USA: Transportation Research Record. Paper prepared for publication in Journal of the Transportation Research Board, No 1215, pp 70-84.

Petry, T. M., Han, Y. P. & Ge, L., 2008. *Determination of Subgrade Soil Field Moisture Conditions Using Soil Suction*, Washington DC, USA: University of Missouri. Paper prepared for presentation and publication at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Rabab'ah, S. & Liang, R. Y., 2008. *Evaluation Of Mechanistic Empirical Design Approach Over Permeable Base Materials*, Washington DC, USA: Gannett Fleming, Inc., Audubon. Paper prepared for presentation and publication at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Rodrigues, M. M. M., 2013. *Guia para a Utilização de Resíduos de Construção e Demolição em Vias Municipais e Rurais e em Valas*, Braga: Universidade do Minho. Dissertação de Mestrado.

Schapery, R. A., 1973. *A Theory of Crack Growth in Viscoelastic Media*, Texas, USA: Texas A&M University.

Simões, F., Lopes, F., Ferreira, A. & Micaelo, R., 2013. *Aplicação a Portugal do novo método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da AASHTO*, Coimbra: Universidade de Coimbra.

Simões, R., 2013. *Estudo do comportamento de Resíduos de Construção e Demolição aplicados em camadas não ligadas de pavimentos*, Lisboa: IST - UTL, Dissertação de Mestrado.

Sirigiripet, S. K., 2007. *Experimental and Field Studies on Recycled materials as pavement bases*, Arlington, USA: University of Texas.

Souliman, M., Mamlouk, M., El-Basyouy, M. & Zapata, C., 2010. *Calibration of the AASHTO MEPDG for Flexible Pavement for Arizona Conditions*, Washington DC, USA: Paper prepared for publication and presentation at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Spadotto, A., Vecchia, L. F. D. & Carli, C. d., 2012. *Avaliação dos resíduos da construção civil em Xanxerê: possibilidade para um fim mais sustentável*, Brasil: Universidade do Oeste de Santa Catarina. Apresentação no VIII Congresso Nacional de Excelência em Gestão.

Stires, N., 2009. *A Study of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for South Carolina*, Columbia, USA: University of South Carolina. Master's thesis.

## Referências bibliográficas

Thenoux, G., Gonzalez, A. & Downling, R., 2006. *Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile*. Nova Zelândia: University of Canterbury.

Tseng, K. & Lytton, R., 1989. *Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials. Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance of Flexible Pavements*, Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials. Paper prepared for publication in ASTM STP 1016, pp 154-172.

UE, 2015. *EUR-Lex*. [Online] Available at: <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html> [Acedido em Fevereiro 2015].

UW, 2014. *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG): Overview - Lecture 1*, Universidade de Wyoming. [Online] Available at: [http://students.uwyo.edu/PSAHA/MEPDG/MEPDG\\_Lecture-1.pdf](http://students.uwyo.edu/PSAHA/MEPDG/MEPDG_Lecture-1.pdf) [Acedido em Outubro 2014].

van der Meer, S. E., Pereira Roders, A. R. & Erkelens, P. A., 2006. *Minimizing C&D Waste through rehabilitation*, Eindhoven, Netherlands: Eindhoven University of Technology. Paper prepared for presentation at the International Conference On Adaptable Building Structures.

Velasquez, R.; Hoegh, K.; Yut, I.; Funk, N.; Cochran, G.; Marasteanu, M.; Khazanovich, L., 2009. *Implementation of the MEPDG for New and Rehabilitated Pavement Structures for Design of Concrete and Asphalt Pavements in Minnesota*, Minneapolis, USA: University of Minnesota.

Von Quintus, H. L. & Moulthrop, J., 2008. *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Flexible Pavement Performance Prediction Models for Montana*, Champaign, USA: Applied Research Associates, Inc., FHWA/MT-07- 008/8158.

Watkins, E.; Hogg, D.; Mitsios, A.; Mudgal, S.; Neubauer, A.; Reisinger, H.; Troeltzsch, J.; Acoleyen, M. Van, 2012. *Use of economic instruments and waste management performances - Final Report*, Brussels, Belgium: DG ENV - European Commission, Contract ENV.G.4/FRA/2008/0112.

Witczak, M. W., Roque, R., Hiltunem, D. R. & Buttlar, W. G., 2000. *Modification and recalibration of superpave thermal cracking model*, USA: College of Engineering and Applied Science, Arizona State University.

WRAP, 2015. *Waste and Resources Action Programme*. [Online] Available at: <http://www.wrap.org.uk/> [Acedido em Fevereiro 2015].

Yang, H. H., 1993. *Pavement Analysis and Design*, New Jersey, USA: Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Yu, H.; Darter, M.I.; Smith, K.D.; Jiang, J.; Khazanovich, L., 1998. *Performance of Concrete Pavements Volume III - Improving Concrete Pavement Performance*, Washington DC, USA: Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-95-111.

## Anexos





## Anexo I. Aplicação DARWin-ME: Materiais

### Camadas betuminosas

Quadro I.1 – Dados de *input* da aplicação DARWin-Me relativos aos materiais de camadas betuminosas.

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
<b>▼ Camada de mistura betuminosa</b>			
Thickness	Espessura	mm	Espessura da camada de mistura betuminosa [25,4; 500]
<b>▼ Características volumétricas da mistura</b>			
Unit weight	Baridade	Kgf/m3	Baridade da mistura betuminosa a usar na construção do pavimento rodoviário [1900; 2600]
Effective binder content	Teor de ligante (por volume)	%	Porcentagem de ligante (por volume). Pode ser obtido através da expressão: $V_b = VMA - V_v$ , sendo que: $V_b$ é volume de ligante (por volume); $VMA$ é volume de vazios no esqueleto do agregado (%); e $V_v$ é volume de vazios (%). [5; 15]
Air voids	Porosidade	%	Volume de vazios na camada de mistura betuminosa a construir [2; 10]
Poisson's ratio	Coefficiente de Poisson	-	Coefficiente de Poisson da mistura betuminosa. Pode ser considerado um valor constante ou pode ser calculado através dos parâmetros A e B da equação
<b>▼ Propriedades mecânicas</b>			
Dynamic modulus	Módulo dinâmico ( $ E^* $ )	-	Inserir propriedades conhecidas para o cálculo do módulo dinâmico. Nível 1 implica ensaios laboratoriais com frequência de carga e temperatura. Níveis 2 e 3 requerem curva granulométrica do agregado. As propriedades dos materiais, a temperatura e velocidade da carga têm efeitos significativos no $ E^* $ (AASHTO, 2008)
G Star Predictive Model	Modelo G Star		Usa a viscosidade baseada no modelo (calibrado para os E.U.A.)
Reference temperature	Temperatura	°C	Inserir temperatura de referência, usada na determinação da curva do módulo dinâmico [15, 26]. Valor recomendado de 21,1 °C
Asphalt binder	Betume	-	Inserir curva granulométrica do agregado para nível 3 ou testes realizados a pavimento convencionais/ <i>SuperPave</i> para nível 1 e 2. Os testes de pavimentos convencionais usam valores de viscosidade e penetração a diferentes temperaturas.
Indirect tensile strength at -10 deg C	Força de tração indireta a -10°C	MPa	Este valor é medido de acordo com a norma AASHTO T322 para níveis 1 e 2. A aplicação calcula internamente um valor através de correlações para o nível 3.

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
Creep compliance	<i>Creep compliance</i>	1/GPa	Este valor é medido de acordo com a norma AASHTO T322 para níveis 1 e 2. A aplicação calcula internamente um valor através de correlações para o nível 3
<b>▼ Características térmicas</b>			
Thermal conductivity	Condutividade térmica	w/m.kelvin	Condutividade térmica da mistura betuminosa à superfície. O projetista deve escolher um valor baseado no histórico da empresa ou um valor típico [0,8; 3,5]
Heat capacity	Capacidade calorífica	Joule/kg.kelvin	Capacidade calorífica dos materiais da mistura betuminosa. O projetista deve escolher um valor baseado no histórico da empresa ou um valor típico [400; 2.000]
Thermal contraction	Contração térmica	Mm/mm/°C	Coeficiente de contração térmica da mistura betuminosa. Se selecionado Falso, a aplicação usa um valor constante. Podem ser definidas as seguintes propriedades: <ol style="list-style-type: none"> <li>Valor constante de coeficiente misto de contração térmica;</li> <li>Coeficiente volumétrico de contração térmica do agregado;</li> <li>Volume de vazios no esqueleto do agregado (<math>VMA</math>) – soma automática dos valores inseridos de <math>V_b</math> e <math>V_v</math>.</li> </ol>

## Camadas granulares e Leito do pavimento

Quadro I.2 - Dados de *input* da aplicação DARWin-Me relativos aos materiais de camadas granulares e leito do pavimento.

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
<b>▼ Camada não-ligada</b>			
Layer thickness	Espessura	mm	Espessura da camada granular ou leito do pavimento [25,4; 9.144]
Poisson's ratio	Coefficiente de Poisson	-	Coefficiente de Poisson da camada granular. Usa um valor por omissão de 0,35 mas pode variar [0,1; 0,4]
Coefficient of lateral earth pressure	Coefficiente de pressão lateral	K0	Rácio entre a pressão lateral e vertical do solo. Usa um valor por omissão de 0,5 [0,4; 0,6]
<b>▼ Módulo</b>			
Resilient modulus	Módulo de deformabilidade	MPa	<p>Módulo de deformabilidade da camada. No nível 3 pode optar-se por duas análises em que:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. o valor é alterado com temperatura/humidade;</li> <li>b. os valores são anuais.</li> </ul> <p>No nível 2 pode optar-se por uma 3ª análise:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>c. com valores mensais.</li> </ul> <p>Neste nível mais preciso, o projetista pode ainda preencher o(os) valor(es) do módulo de deformabilidade e complementá-lo(s) com um dos seguintes valores: CBR, R-value, coeficiente ai da camada ou teste DPI (mm/sopro). Pode ainda definir-se pelo índice de plasticidade e granulometria</p>
<b>▼ Granulometria</b>			
Gradation and others engineering properties	Granulometria e outras propriedades	-	<p>Fuso granulométrico e limites de consistência e de saturação dos materiais não-ligados ou do leito do pavimento. Para além do fuso granulométrico podem ainda preencher-se os seguintes parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Limite de liquidez;</li> <li>b. Índice de plasticidade;</li> <li>c. Camada compactada (sim ou não);</li> <li>d. Densidade máxima molhada (kgf/m3);</li> <li>e. Condutividade de saturação hidráulica (m/hr);</li> <li>f. Gravidade específica dos sólidos;</li> <li>g. Teor de água óptimo (%);</li> <li>h. Curva caraterística de água no solo (SWCC).</li> </ul>



## Anexo II. Aplicação DARWin-ME: Tráfego

Quadro II.1 - Dados de *input* da aplicação DARWin-Me relativos ao tráfego.

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
<b>▼ Tráfego médio diário anual de pesados</b>			
Two-way AADTT	TMDAp	-	Tráfego médio diário anual de veículos pesados (mín. 10). Este parâmetro tem impacto significativo na previsão de desempenho do pavimento. Deve assegurar-se que o valor representa os 2 sentidos e todas as vias.
Number of lanes	Número de vias	-	Número de vias no sentido de projeto [1; 6]
Percent trucks in design diretion	Veículos pesados p/ sentido	%	Percentagem de veículos pesados para o sentido de projeto (em relação ao total da estrada). Se for uma estrada com uma via de sentido único, então este valor será de 100%.
Percent trucks in design lane	Veículos pesados na via de pesados	%	Percentagem de veículos na via de pesados, ou seja, a(s) via(s) mais à direita, em relação ao número total de veículos pesados por sentido [0; 100] Para o MEPDG a definição a aplicar é ligeiramente diferente: é a percentagem de veículos da classe (de veículos) mais significativa, porque o MEPDG estima a % de veículos pesados para cada classe e tem como referência esta classe, classificada como a principal.
Operational speed	Velocidade operacional	km/h	Velocidade média do tráfego. Este parâmetro tem impacto na frequência de carga nas camadas betuminosas [10; 120] Tem efeito no cálculo do módulo dinâmico  E*  nas camadas betuminosas, e, consequentemente, extensões. Velocidades baixas resultam em valores de danos incrementais mais altos (maior fendilhamento por fadiga e maiores rodeiras).
<b>▼ Capacidade de tráfego</b>			
Traffic capacity cap	Capacidade de tráfego	-	Por omissão, não é contabilizado este parâmetro. No entanto, caso se pretenda limitar a capacidade de tráfego pode optar-se por preencher os seguintes parâmetros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tráfego médio diário anual excluindo tráfego pesado;</li> <li>• Taxa de crescimento linear de veículos não-pesados;</li> <li>• Tipo de via: auto-estrada; estrada com várias vias; estrada com 2 vias;</li> <li>• Sinais luminosos (sim/não);</li> <li>• Tipo de cruzamento (nível; denivelado);</li> <li>• Tipo de ambiente (rural/urbano);</li> <li>• Valor limite de capacidade;</li> <li>• Imposição de limite de capacidade da estrada (sim/não).</li> </ul>

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
<b>▼ Configuração dos eixos</b>			
Average axle width	Largura média do eixo	m	Distância entre os extremos de um eixo. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 2,59 para um veículo pesado comum [2,4; 3]
Dual tire spacing	Distância entre pneus de roda dupla	mm	Distância entre os centros de roda dupla. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 305 mm para veículos pesados [0; 600]
Tire pressure	Pressão dos pneus	kPa	Pressão dos pneus a quente. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 827,4 kPa [827,4; 827,4]
Duplo axle spacing	Distância entre eixos duplo	m	Distância média entre 2 eixos consecutivos de uma configuração dupla (2 eixos seguidos). Valor recomendado, preenchido por omissão, de 1,31 m [0,6; 3,7]
Triplo axle spacing	Distância entre eixos triplo	m	Distância média entre 2 eixos consecutivos de uma configuração tripla (3 eixos seguidos). Valor recomendado, preenchido por omissão, de 1,25 m [0,6; 3,7]
Quad axle spacing	Distância entre eixos quad	m	Distância média entre 2 eixos consecutivos de uma configuração quádrupla (4 eixos seguidos). Valor recomendado, preenchido por omissão, de 1,25 m [0,6; 3,7]
<b>▼ Desvio lateral</b>			
Mean wheel location	Localização média do pneu	mm	Distância entre a linha guia e o extremo do pneu. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 460 mm [0; 910]
Traffic wander standard deviation	Desvio padrão da linha de pneu	mm	Média do desvio padrão da linha de circulação do tráfego, ou seja, desvio transversal da linha média de rodagem. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 254 mm [170; 3300]
Design lane width	Largura da via	m	Distância entre as marcas laterais da via de pesados. Corresponde ao fator de projeto e pode ou não corresponder à largura da placa (no caso dos pavimentos rígidos). Valor recomendado, preenchido por omissão, de 3,7 m para largura <i>standard</i> da via [3; 4]
<b>▼ Configuração dos eixos</b>			
Average spacing of short axles	Espaçamento médio de eixos curtos	m	Espaçamento médio de eixos curtos. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 3,658 m [3; 4,5]
Average spacing of medium axles	Espaçamento médio de eixos médios	m	Espaçamento médio de eixos médios. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 4,572 m [3,5; 5,5]
Average spacing of long axles	Espaçamento médio de eixos longos	m	Espaçamento médio de eixos longos. Valor recomendado, preenchido por omissão, de 5,486 m [4,5; 6]
Percent trucks with short axles	Veículos pesados com eixos curtos	%	Porcentagem de veículos pesados com eixos curtos. Recomenda-se distribuição equitativa pelos diferentes eixos, caso não exista informação disponível (mín. 0)
Percent trucks with medium axles	Veículos pesados com eixos médios	%	Porcentagem de veículos pesados com eixos médios. Recomenda-se distribuição equitativa pelos diferentes eixos, caso não exista informação disponível (mín. 0)

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
Percent trucks with long axles	Veículos pesados com eixos longos	%	Porcentagem de veículos pesados com eixos longos. Recomenda-se distribuição equitativa pelos diferentes eixos, caso não exista informação disponível (mín. 0)
<b>▼ Distribuição e Crescimento por classe de veículo</b>			
-	-	-	<p>Quadro com as seguintes colunas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe de veículo;</li> <li>• Distribuição (%);</li> <li>• Taxa de crescimento (%);</li> <li>• Função de crescimento (nenhuma, linear ou composta).</li> </ul> <p>Pode optar-se por escolher um cenário de tráfego pesado, através do botão "Carregar distribuição". Cada opção tem uma pequena descrição do tipo de tráfego predominante, percentagem de autocarros e atrelados e apresenta um quadro de distribuição pré-definido.</p>
<b>▼ Ajuste mensal</b>			
-	-	-	Quadro 12x10, em que as linhas correspondem aos meses do ano e as colunas às classes de veículos pesados [classe 4; classe 13]. Pode optar-se por importar um ficheiro .txt através do botão "Importar ajuste mensal".
<b>▼ Eixos por veículo pesado</b>			
-	-	-	Quadro 10x4, em que as linhas correspondem às classes de veículos pesados e as colunas aos eixos simples, duplo, triplo e quad.





## Anexo III. Aplicação DARWin-ME: Condições Climáticas

Quadro III.1 - Dados de *input* da aplicação DARWin-Me relativos às condições climáticas.

Properties	Propriedades	Unidade	Descrição
<b>▼ Estação metereológica</b>			
Longitude	Longitude	decimal degrees	Longitude do local do projeto. Oeste é negativo. Exemplo de longitude: 90°, 30 min corresponde a W = -90,5° [-180; 180]
Latitude	Latitude	decimal degrees	Latitude do local do projeto. Sul é negativo. Exemplo de longitude: 40°, 30 min corresponde a N = 40,5° [-90; 90]
Elevation	Elevação	m	Cota do local do projeto. A cota é usada para determinar a diferença de temperatura (temperatura varia com a cota) [-60; 3048]
Depth of water table	Altura média da água do mar	m	Pode inserir-se uma altura média anual ou 4 alturas médias de acordo com as estações do ano [0; 30]
Climate station	Estação metereológica	-	Escolher a estação metereológica do local do projeto. Pode optar-se por criar uma estação virtual com recurso às existentes, selecionando as estações mais próximas e indicando a distância entre cada estação e o local do projeto.
<b>▼ Quadro resumo</b>			
-	-	-	<p>Apresentação das características resumo das estação(ões) escolhida(s):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura média anual (°C);</li> <li>• Precipitação média anual (mm);</li> <li>• Número de dias com precipitação;</li> <li>• Índice de congelamento (°C.dia)</li> <li>• Número médio anual de ciclos gelo/degelo;</li> <li>• Temperatura média de cada mês.</li> </ul>
<b>▼ Dados horários das condições metereológicas</b>			
-	-	-	<p>Quadro com as seguintes colunas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Data e hora;</li> <li>• Temperatura (°C);</li> <li>• Velocidade do vento (km/h);</li> <li>• Sol (%);</li> <li>• Precipitação (mm);</li> <li>• Humidade (%);</li> <li>• Altura da água do mar.</li> </ul>



## Anexo IV. Classificação dos agregados reciclados

### Especificação LNEC E 473

Quadro IV.1 – Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 473.

Material	Classe	Proporção dos constituintes					
		Rc+Ru+Rg	Rg	Rb	Ra	FL	X
MBB	-	29	0	1,8	69,1	0,1	0
	B	≥ 90	≤ 5	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	C	≥ 50	≤ 5	≤ 10	≤ 30	≤ 5	≤ 1
BBM	-	84,3	0,25	13,15	1,85	0,6	0,1
	B	≥ 90	≤ 5	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	C	≥ 50	≤ 5	≤ 10	≤ 30	≤ 5	≤ 1
COMP	-	75,13	0	0	24,87	0	0
	B	≥ 90	≤ 5	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	C	≥ 50	≤ 5	≤ 10	≤ 30	≤ 5	≤ 1

Quadro IV.2 – Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 473.

Requisitos técnicos	Material	Categoria		
	<b>MBB</b>	<b>AGER1</b>	<b>AGER2</b>	AGER3
Dimensão	31,8	0 / 31,5	0 / 31,5	0 / 31,5
Sobretamanhos	OC80	OC75	OC80	OC85
Teor de finos	UF3	UF9	UF9	UF9
	LF2	LF2	LF2	LF2
Qualidade dos finos	0,168	≤ 1	≤ 0,8	≤ 0,8
Resist. à fragmentação e resistência ao desgaste	25	LA45	LA40	LA40
	18	MDE45	MDE40	MDE35
	43	≤ 85	≤ 75	≤ 70
Teor em sulfatos solúveis	0,01	SS0,7	SS0,7	SS0,7
	<b>BBM</b>	<b>AGER1</b>	AGER2	AGER3
Dimensão	40	0 / 31,5	0 / 31,5	0 / 31,5
Sobretamanhos	OC90	OC75	OC80	OC85
Teor de finos	UF5	UF9	UF9	UF9
	LF2	LF2	LF2	LF2
Qualidade dos finos	0,462	≤ 1	≤ 0,8	≤ 0,8
Resist. à fragmentação e resistência ao desgaste	44	LA45	LA40	LA40
	36	MDE45	MDE40	MDE35
	80	≤ 85	≤ 75	≤ 70
Teor em sulfatos solúveis	0,08	SS0,7	SS0,7	SS0,7
	<b>COMP</b>	<b>AGER1</b>	AGER2	AGER3
Dimensão	31,5	0 / 31,5	0 / 31,5	0 / 31,5
Sobretamanhos	OC90	OC75	OC80	OC85

## Classificação dos agregados reciclados

Requisitos técnicos	Material	Categoria		
Teor de finos	UF7	UF9	UF9	UF9
	LF4	LF2	LF2	LF2
Qualidade dos finos	0,962	≤ 1	≤ 0,8	≤ 0,8
Resist. à fragmentação e resistência ao desgaste	27	LA45	LA40	LA40
	18	MDE45	MDE40	MDE35
	45	≤ 85	≤ 75	≤ 70
Teor em sulfatos solúveis	0,01	SS0,7	SS0,7	SS0,7

## Especificação LNEC E 474

Quadro IV.3 - Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo a especificação LNEC E 474.

Material	Classe	Proporção dos constituintes					
		Rc+Ru+Rg	Rg	Rb	Ra	FL	X
MBB	-	29	0	1,8	69,1	0,1	0
	B	≥ 90	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	<b>MB</b>	≤ 70	≤ 25	≤ 70	≥ 30	≤ 5	≤ 1
	C	s.l	≤ 25	s.l	≤ 30	≤ 5	≤ 1
BBM	-	84,3	0,25	13,15	1,85	0,6	0,1
	B	≥ 90	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	MB	≤ 70	≤ 25	≤ 70	≥ 30	≤ 5	≤ 1
	<b>C</b>	s.l	≤ 25	s.l	≤ 30	≤ 5	≤ 1
COMP	-	75,13	0	0	24,87	0	0
	B	≥ 90	≤ 10	≤ 10	≤ 5	≤ 5	≤ 1
	MB	≤ 70	≤ 25	≤ 70	≥ 30	≤ 5	≤ 1
	<b>C</b>	s.l	≤ 25	s.l	≤ 30	≤ 5	≤ 1

Legenda: s.l – sem limite

## Proposta de alteração

A proposta de alteração às normas LNEC assenta nos mesmos critérios do LNEC para a classificação relativa à proporção dos constituintes. Para simplificar a denominação das classes apenas se alteraram os nomes das classes B e C da norma LNEC E 473 para B1 e C1.

Quadro IV.4 - Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo a proposta de alteração às especificações LNEC.

Propriedade	Material	Leito pavim. / sub-base			Base		Camada desgaste	
Categoria		AR2			AR3		AR4	
Classe		B	MB	C	B1	C1	B1	C1
	BBM							
Dimensão máxima, mm	31,5	80			40		40	
Teor de finos (passado no # 0,063 mm), %	3	≤ 15			≤ 10		≤ 9	
Equivalente de areia, %	84	EA ≥ 30 ou			EA ≥ 50 ou		EA ≥ 50 ou	
Azul de metileno <sup>(1)</sup> , %	0,168	MB <sub>0/D</sub> < 2,5			MB <sub>0/D</sub> < 2,0		MB <sub>0/D</sub> < 2,0	
Resistência à fragmentação (LA), %	25	LA ≤ 50			LA ≤ 45 ou		LA ≤ 40 ou	

Propriedade	Material	Leito pavim. / sub-base			Base		Camada desgaste	
Resistência ao desgaste (MDE), %	18				MDE ≤ 45		MDE ≤ 40	
Teor de sulfatos solúveis em água <sup>(2)</sup> , %	0,01				≤ 0,7			
Categoria		<b>AR2</b>			<b>AR3</b>		<b>AR4</b>	
Classe		B	MB	C	B1	C1	B1	C1
		MBB						
Dimensão máxima, mm	40	80			40		40	
Teor de finos (passado no # 0,063 mm), %	3,5	≤ 15			≤ 10		≤ 9	
Equivalente de areia, %	92	EA ≥ 30 ou			EA ≥ 50 ou		EA ≥ 50 ou	
Azul de metileno <sup>(1)</sup> , %	0,462	MB <sub>0/D</sub> < 2,5			MB <sub>0/D</sub> < 2,0		MB <sub>0/D</sub> < 2,0	
Resistência à fragmentação (LA), %	44	LA ≤ 50			LA ≤ 45 ou		LA ≤ 40 ou	
Resistência ao desgaste (MDE), %	36				MDE ≤ 45		MDE ≤ 40	
Teor de sulfatos solúveis em água <sup>(2)</sup> , %	0,08				≤ 0,7			
Categoria		<b>AR2</b>			<b>AR3</b>		<b>AR4</b>	
Classe		B	MB	C	B1	C1	B1	C1
		COMP						
Dimensão máxima, mm	31,5	80			40		40	
Teor de finos (passado no # 0,063 mm), %	5,7	≤ 15			≤ 10		≤ 9	
Equivalente de areia, %	47	EA ≥ 30 ou			EA ≥ 50 ou		EA ≥ 50 ou	
Azul de metileno <sup>(1)</sup> , %	0,962	MB <sub>0/D</sub> < 2,5			MB <sub>0/D</sub> < 2,0		MB <sub>0/D</sub> < 2,0	
Resistência à fragmentação (LA), %	27	LA ≤ 50			LA ≤ 45 ou		LA ≤ 40 ou	
Resistência ao desgaste (MDE), %	18				MDE ≤ 45		MDE ≤ 40	
Teor de sulfatos solúveis em água <sup>(2)</sup> , %	0,01				≤ 0,7			

### Guia espanhol GEAR

Quadro IV.5 - Classificação (classe) dos agregados reciclados segundo o Guia GEAR (GERD, 2011).

Material	Classe	Proporção dos constituintes			
		Rc+Ru	Rb	Ra	X
MBB		29	1,8	69,1	0
	ARH	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 1
	ARMh	≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1
	ARMc	< 70	> 30	≤ 5	≤ 1
	ARMa	-	-	5 - 30	≤ 1
BBM		84,05	13,15	1,85	0,1
	ARH	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 1
	<b>ARMh</b>	≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1
	ARMc	< 70	> 30	≤ 5	≤ 1
	ARMa	-	-	5 - 30	≤ 1

Classificação dos agregados reciclados

Material	Classe	Proporção dos constituintes			
		Rc+Ru	Rb	Ra	X
COMP		75,13	0	24,87	0
	ARH	≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 1
	ARMh	≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1
	ARMc	< 70	> 30	≤ 5	≤ 1
	<b>ARMa</b>	-	-	5 - 30	≤ 1

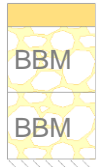
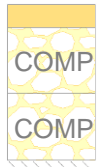

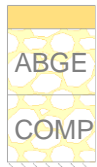
Quadro IV.6 - Classificação (categoria) dos agregados reciclados segundo o Guia GEAR (GERD, 2011).

Requisitos técnicos	Material	Categoria			
		Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
	<b>MBB</b>	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
Índice de achatamento	6	< 35 %	< 35 %	< 35 %	< 35 %
Partículas trituradas	100	100 %	≥ 75 %	≥ 50 %	≥ 75 %
Composição	-	ARH ou ARMa	ARH, ARMa ou ARMc	todas	todas
Coeficiente LA	25	≤ 35 %	≤ 35 %	≤ 40 %	≤ 45 %
Plasticidade	NP	NP	NP	NP	< 6
Equivalente de Areia	84	> 40 %	> 40 %	> 35 %	> 30 %
Coeficiente de limpeza*	limpo	< 2 %	< 2 %	< 2 %	n. a.
Compostos de enxofre	< 0,12	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solúveis em água	0,01	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
	<b>BBM</b>	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
Índice de achatamento	17	< 35 %	< 35 %	< 35 %	< 35 %
Partículas trituradas	100	100 %	≥ 75 %	≥ 50 %	≥ 75 %
Composição	ARMh	ARH ou ARMa	ARH, ARMa ou ARMc	todas	todas
Coeficiente LA	44	≤ 35 %	≤ 35 %	≤ 40 %	≤ 45 %
Plasticidade	NP	NP	NP	NP	< 6
Equivalente de Areia	92	> 40 %	> 40 %	> 35 %	> 30 %
Coeficiente de limpeza*	limpo	< 2 %	< 2 %	< 2 %	n. a.
Compostos de enxofre	< 0,12	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solúveis em água	0,01	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
	<b>COMP</b>	Cat 1	Cat 2	Cat 3	Cat 4
Índice de achatamento	13	< 35 %	< 35 %	< 35 %	< 35 %
Partículas trituradas	100	100 %	≥ 75 %	≥ 50 %	≥ 75 %
Composição	ARMa	ARH ou ARMa	ARH, ARMa ou ARMc	todas	todas
Coeficiente LA	27	≤ 35 %	≤ 35 %	≤ 40 %	≤ 45 %
Plasticidade	NP	NP	NP	NP	< 6
Equivalente de Areia	47	> 40 %	> 40 %	> 35 %	> 30 %
Coeficiente de limpeza*	limpo	< 2 %	< 2 %	< 2 %	n. a.
Compostos de enxofre	< 0,12	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %	≤ 1 %
Sulfatos solúveis em água	0,01	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %

\* valor considerado. NP – não plástico.

## Anexo V. Dados de cálculo: método da Shell

Quadro V.1 – Propriedades das estruturas de pavimento: utilização da aplicação BISAR (para 10 anos).

Estrutura	ID	Temp. (°C)	v <sub>b</sub> (%)	E (MPa)				
				BD	MBD	Base	Sub-base	Fundação
 10 anos	A	29,5	9,26	2600	3000	173	102	60
	B	29,5	9,26	2800	3300	173	102	60
	D	24,3	11,66	4400	-	289	170	100
	E	24,3	11,66	4700	-	289	170	100
	F	28,7	9,26	3200	3700	289	170	100
	G	-	-	-	-	289	170	100
	 10 anos	A	25,0	11,66	4100	-	240	120
B		29,5	9,26	2800	3300	240	120	60
D		24,3	11,66	4400	-	324	180	100
E		24,3	11,66	4700	-	324	180	100
F		24,3	11,66	5000	-	400	200	100
G		-	-	-	-	324	180	100
 10 anos		A	25,0	11,66	4100	-	221	102
	B	29,5	9,26	2800	3300	221	102	60
	D	24,3	11,66	4400	-	324	170	100
	E	24,3	11,66	4700	-	324	170	100
	F	28,7	9,26	3200	3700	369	170	100
	G	-	-	-	-	324	170	100
	 10 anos	A	25,0	11,66	4100	-	260	120
B		29,5	9,26	2800	3300	260	120	60
D		24,3	11,66	4400	-	343	180	100
E		24,3	11,66	4700	-	343	180	100
F		24,3	11,66	5000	-	434	200	100
G		-	-	-	-	343	180	100
H		-	-	-	-	260	120	60

Quadro V.2 – Propriedades das estruturas de pavimento: utilização da aplicação BISAR (para 20 anos).

Estrutura	ID	Temp. (°C)	v <sub>b</sub> (%)	E (MPa)				
				BD	MBD	Base	Sub-base	Fundação
Catálogo C (BBM) 20 anos	D	24,3	11,66	4400	-	289	170	100
	E	24,3	11,66	4700	-	369	170	100
	G	-	-	-	-	369	170	100
Catálogo D (COMP) 20 anos	D	24,3	11,66	4400	-	324	180	100
	E	24,3	11,66	4700	-	400	200	100
	F	24,3	11,66	5000	-	434	200	100
	G	-	-	-	-	434	200	100



## Anexo VI. Dados dos materiais: MEPDG

### Camadas betuminosas

Quadro VI.1 – Propriedades das camadas betuminosas e revestimento superficial utilizadas na aplicação DARWin-ME.

Propriedades	Valores		
	AC 14 surf (BB)	AC 20 bin (MBD)	Rev superf.
<b>▼ Camada de mistura betuminosa</b>			
Espessura (mm)	50	50-70	25
<b>▼ Características volumétricas da mistura</b>			
Baridade (kgf/m <sup>3</sup> )	2300	2200	2300
Teor de ligante (%)	12	9	9
Porosidade (%)	4	6	3
Coefficiente de Poisson	0,35	0,35	0,35
<b>▼ Propriedades mecânicas</b>			
Módulo dinâmico ( E* )	-	-	-
Fuso granulométrico	Input nível 3	Input nível 3	Input nível 3
19 mm	100	93	100
9,5 mm	71	69	62,5
4,75 mm	49	53	9,4
0,075 mm	7	8	0
Modelo G Star		= usar calibração E.U.A.	
Temperatura (°C)	-	-	-
Beja		28,7 (F3); 29,5 (F2)	
Lisboa		27,1 (F3); 27,5 (F2)	
Coimbra		27,0 (F3); 27,5 (F2)	
Porto		24,3 (F3); 25,0 (F2)	
Betume	Pen 40-50	Pen 40-50	AC 2.5
Força de tracção indireta a -10°C (MPa)	= 3,13		
Creep compliance (1/GPa)		= input nível 3	
Conductividade térmica (w/m.kelvin)	= 1,16		
Capacidade calorífica (Joule/kg.kelvin)	= 963		
Contração térmica (Mm/mm/°C)	= 1,837E-05		

## Camadas granulares

Quadro VI.2 – Propriedades das camadas granulares utilizadas na aplicação DARWin-ME.

Propriedades	Valores		
	ABGE	BBM	COMP
<b>▼ Camada não-ligada</b>			
Espessura (mm)	150-200	150-200	150-200
Coeficiente de Poisson		= 0,35	
Coeficiente de pressão lateral (K0)		= 0,5	
<b>▼ Módulo</b>			
Módulo de deformabilidade (MPa)			
Alterar valor com temp./hum.		- depende da camada inferior -	
<b>▼ Granulometria</b>			
Granulometria e outras propriedades-			
Fuso granulométrico			
50 mm	100	100	100
37,5 mm	98,8	92,1	98,7
25 mm	88	69,9	88,6
19 mm	80,7	56	81,5
9,5 mm	59,1	33,6	59,5
4,75 mm	39,6	22,7	39,6
2 mm	27	17	26,4
1,18 mm	17,9	12,9	17
0,425 mm	12	7,9	10,8
0,075 mm	7,1	2,7	5,9
Limite de liquidez		0	
Índice de plasticidade		0	
Camada compacta		sim	
Densidade máxima molhada (kgf/m <sup>3</sup> )	= 2045,1	= 2045,1	= 2035,6
Condutividade de saturaç. hidráulica(m/hr)	= 2,437E-02	= 8,524E-01	= 6,381E-02
Gravidade específica dos sólidos	= 2,7	= 2,7	= 2,7
Teor de água óptimo (%)	= 6,3	= 12,4	= 6,3

## Anexo VII. Dados de tráfego: MEPDG



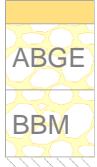
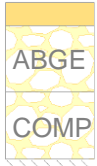
Quadro VII.1 – Características do tráfego utilizadas na aplicação DARWin-ME.

Propriedades	T7a	T7b	T6 TTC 12	T6 TTC 14
<b>▼ Tráfego médio diário anual de pesados</b>				
TMDAp	25	50	150	150
<b>TMDAp (corrigido)</b>	<b>167</b>	<b>333</b>	<b>857</b>	<b>1000</b>
Número de vias			1	
Veículos pesados p/ sentido (%)			50	
Veículos pesados na via de pesados (%)			100	
Velocidade operacional (km/h)	30	40	50	50
<b>▼ Capacidade de tráfego</b>				
Capacidade de tráfego			= NA	
<b>▼ Configuração dos eixos</b>				
Largura média do eixo (m)			= 2,59	
Distância entre pneus de roda dupla (mm)			= 305	
Pressão dos pneus (kPa)			= 827,4	
Distância entre eixos duplos (m)			= 1,31	
Distância entre eixos triplos (m)			= 1,25	
Distância entre eixos quádruplos (m)			= 1,25	
<b>▼ Desvio lateral</b>				
Localização média do pneu (mm)			= 460	
Desvio padrão da linha de pneu (mm)			= 254	
Largura da via (m)			3	
<b>▼ Configuração dos eixos</b>				
Espaçamento médio de eixos curtos (m)			= 3,66	
Espaçamento médio de eixos médios (m)			= 4,57	
Espaçamento médio de eixos longos (m)			= 5,49	
Veículos pesados com eixos curtos (m)			= 33	
Veículos pesados com eixos médios (%)			= 33	
Veículos pesados com eixos longos (%)			= 33	



## Anexo VIII. Ficha resumo: método da Shell

Quadro VIII.1 – Resultados da aplicação do método da Shell (com recurso ao BISAR) para estruturas de pavimento presentes nos catálogos A e B (10 anos).

Estrutura	ID	Deformações admissíveis		Dano por deformação a 10 anos		Ruína	
		$e_t (x10^{-6})$	$e_c (x10^{-6})$	Fadiga	Def. Perm.	Ano	Condicion.
 10 anos	A	302	538	97 %	9 %	10	Fadiga
	B	248	465	86 %	10 %	11	Fadiga
	D	267	609	37 %	14 %	23	Fadiga
	E	254	439	66 %	8 %	14	Fadiga
	F	181	301	66 %	5 %	14	Fadiga
	G	-	880	-	62%	15	Def. perm.
	A	304	650	63 %	18 %	15	Fadiga
 10 anos	B	247	496	84 %	12 %	11	Fadiga
	D	246	593	25 %	13 %	25*	Fadiga
	E	242	589	51 %	25 %	17	Fadiga
	F	195	399	59 %	16 %	16	Fadiga
	G	-	859	-	56%	16	Def. perm.
	A	324	670	87 %	21 %	11	Fadiga
	B	226	447	54 %	8 %	17	Fadiga
 10 anos	D	247	595	25 %	13 %	25*	Fadiga
	E	243	592	53 %	25 %	17	Fadiga
	F	184	323	7 %	71 %	13	Fadiga
	G	-	865	-	58 %	16	Def. perm.
	A	287	636	47 %	17 %	19	Fadiga
	B	238	488	70 %	12 %	13	Fadiga
	D	236	585	20 %	12 %	25	Fadiga
 10 anos	E	233	582	43 %	24 %	20	Fadiga
	F	183	390	43 %	14 %	20	Fadiga
	G	-	851	-	54 %	17	Def. perm.
	H	-	942	-	81 %	12	Def. perm.

\* Considerou-se o limite máximo de 25 anos.




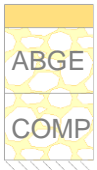
Quadro VIII.2 – Resultados da aplicação do método da Shell (com recurso ao BISAR) para estruturas de pavimento presentes nos catálogos C e D (20 anos).

Estrutura	ID	Deformações admissíveis		Dano por deformação a 20 anos		Ruína	
		$e_t (x10^{-6})$	$e_c (x10^{-6})$	Fadiga	Def. Perm.	Ano	Condicion.
Catálogo C (BBM)	D	267	609	83 %	31 %	23	Fadiga
	E	212	413	59 %	13 %	25*	Fadiga
	G	-	597	-	29 %	25*	Def. perm.
Catálogo D (COMP)	D	246	593	55 %	28 %	25*	Fadiga
	E	197	400	41 %	12 %	25*	Fadiga
	F	183	390	95 %	32 %	20	Fadiga
	G	-	565	-	23 %	25*	Def. perm.

## Anexo IX. Ficha resumo: MEPDG

Valores alvo: IRI = 3 m/km; Def. Total = 16,5 mm; Pele de crocodilo = 35%  
Grau de confinção = 90%

Quadro IX.1 – Resultados da aplicação do MEPDG (com recurso ao DARWin-ME).

Estrutura	ID	IRI		Deformação total		Pele de crocodilo	
		Valor	R (%)	Valor	R (%)	Valor	R (%)
 10 anos	A	1,91	100	14,24	99,17	1,68	100
	B	1,95	99,99	15,47	96,07	1,8	100
	D	1,87	100	13,67	99,67	1,45	100
	E	1,9	100	14,56	98,71	1,45	100
	F	1,96	99,99	16,59	89,43	1,89	100
	F*	1,96	99,99	16,75	88,12	1,92	100
	G	1,91	100	14,97	97,78	1,45	100
 10 anos	A	1,99	99,99	17,09	84,75	1,45	100
	B	1,96	99,99	15,81	94,53	2,03	100
	D	1,84	100	12,62	99,96	1,45	100
	E	1,89	100	14,12	99,31	1,45	100
	F	1,94	100	15,89	94,08	1,45	100
	F*	1,94	100	15,98	93,53	1,45	100
	G	1,88	100	14,03	99,38	1,45	100
 10 anos	A	2	99,99	17,48	80,5	1,45	100
	B	1,95	99,99	15,52	95,87	1,85	100
	D	1,86	100	13,24	99,85	1,45	100
	E	1,91	100	14,84	98,12	1,45	100
	F	1,93	100	15,71	94,79	2,38	100
	F*	1,94	100	15,88	93,96	2,54	100
	G	1,90	100	14,67	98,47	1,45	100
 10 anos	A	1,98	99,99	16,72	88,28	1,45	100
	B	1,96	99,99	15,83	94,44	1,94	100
	D	1,86	100	13,20	99,86	1,45	100
	E	1,91	100	14,80	98,22	1,45	100
	F	1,95	99,99	16,51	90,02	1,45	100
	F*	1,96	99,99	16,60	89,32	1,45	100
	G	1,90	100	14,55	98,69	1,45	100
	H	2,07	99,97	19,83	49,00	1,45	100
Catálogo C (BBM) 20 anos	D	2,17	99,92	15,56	95,78	1,45	100
	E	2,19	99,90	16,33	91,31	1,45	100
	G	2,17	99,92	15,59	95,62	1,45	100

Ficha resumo: MEPDG

Estrutura	ID	IRI		Deform. total		Pele de crocodilo	
		Valor	R (%)	Valor	R (%)	Valor	R (%)
Catálogo D (COMP) 20 anos	D	2,14	99,94	14,49	98,82	1,45	100
	E	2,15	99,93	14,93	97,88	1,45	100
	F	2,28	99,77	19,49	55,13	1,45	100
	F*	2,28	99,76	19,62	53,42	1,45	100
	G	2,12	99,95	13,82	99,56	1,45	100

Legenda: R – Grau de confiança (%); \*com distribuição TTC 12 (ao contrário de todos os outros cenários nos quais se usou a TTC 14).