



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Custos Adicionais de Operação dos Veículos devidos ao Estado dos Pavimentos**

**João Carlos Simão Guerra**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Bertha Maria Batista dos Santos

Covilhã, Outubro de 2011



*"O trabalho afasta de nós três grandes males: o  
tédio, o vício e a necessidade."*

*(Voltaire)*

*Dedico este trabalho aos meus  
pais, Joaquim e Gracinda...*



## **Agradecimentos**

A realização deste trabalho foi apenas possível com o apoio e ajuda, quer directa ou indirectamente, de várias pessoas, às quais gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço à Professora Doutora Bertha Maria Batista dos Santos, orientadora científica desta dissertação, pela excelente orientação e por todo o auxílio e dedicação sempre demonstrados ao longo da realização do trabalho, além da disponibilidade e cordialidade com que sempre me recebeu. Agradeço-lhe ainda todo o apoio científico prestado e o interesse que me suscitou pela área dos custos dos utentes da estrada.

De forma especial, agradeço aos meus pais pelo apoio, encorajamento, amor, educação transmitida e confiança depositada. A eles um muito obrigado por todos os sacrifícios que permitiram a minha formação. À minha irmã, Filipa, e cunhado, Hélder, agradeço por todo o carinho e incentivo cedido. Deixo ainda uma palavra de gratidão aos avós, tios e primos que sempre me inculcaram a alegria de viver e a importância do trabalho e esforço como base de qualquer recompensa, e ainda por me fazerem sentir orgulhoso de pertencer a esta família.

A todos os colegas e amigos da UBI agradeço todo o companheirismo, simpatia e essencialmente a amizade desenvolvida ao longo destes anos. Aos restantes amigos, obrigado pela motivação, pelos momentos de boa disposição que sempre me proporcionaram e por torcerem por mim.

À Rita agradeço por todo o apoio, compreensão, incentivo e companhia ao longo da realização deste trabalho.



## **Resumo**

Com a conjuntura económica muito fragilizada torna-se indispensável aperfeiçoar a estimação de todos os custos relacionados com o sistema rodoviário, incluindo portanto os custos dos utentes das estradas. Estes custos suportados pelos utentes são em geral de difícil quantificação e constituem uma componente muito importante dos custos do sistema rodoviário.

Para quantificar os custos dos utentes foi desenvolvido em duas Universidades Portuguesas (Beira Interior e Coimbra), entre 2004 e 2008, um trabalho de doutoramento que resultou na criação de um Modelo de Custos dos Utesntes das Estradas com aplicação à rede rodoviária nacional, permitindo a consideração desta componente nas análises de ciclo de vida efectuadas na rede rodoviária portuguesa. Este modelo permite a obtenção de custos médios dos utentes, sendo divididos nas parcelas dos custos de operação dos veículos, do tempo de percurso, dos acidentes e, quando aplicável, de portagem.

O trabalho que aqui se apresenta pretende validar um refinamento proposto para o modelo anterior através da inclusão, nos cálculos do modelo, dos custos adicionais de operação dos veículos devidos à evolução no tempo das degradações dos pavimentos rodoviários, ou seja, devido ao estado do pavimento.

São analisados e testados diversos modelos e estudos que consideram o estado dos pavimentos como um factor que pode influenciar os custos de operação dos veículos. Entre os modelos e estudos considerados na análise salientam-se a formulação proposta para o Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP) da rede rodoviária portuguesa, o estudo desenvolvido pelo “Transportation Research Board” e pela “American Society for Testing and Materials” (TRB-ASTM), o modelo de custos dos utentes da Junta Autónoma de Estradas (JAE) e o modelo de custos dos utentes do Banco Mundial (HDM-4).

O resultado da análise efectuada conduziu à verificação e validação da proposta de formulação considerada. Foi ainda realizada uma aplicação prática desta formulação a uma rede de auto-estradas concessionada, tendo-se obtido resultados que apontam para um custo adicional dos utentes de aproximadamente 3% para estados dos pavimentos que justifiquem operações de intervenção na rede. Este valor pode representar 6% de custo adicional para estados de degradação mais avançados

## **Palavras-chave**

Custos dos Utesntes da Estrada, Custos de Operação dos Veículos, Estado do Pavimento, Present Serviceability Index, International Roughness Index.



## **Abstract**

With the very fragile economic conjecture it becomes indispensable to estimate accurately all the costs related to the road system, including the road user costs. These costs supported by the users are generally difficult to quantify and constitute an important part of the road system costs.

It was developed in two Portuguese Universities (UBI and Coimbra), between 2004 and 2008, a PhD work to quantify the user's costs that gave origin to the creation of a Model of Road User Costs with application to the national road network, allowing the consideration of this component in the Life-Cycle analysis done in the Portuguese road network. This model allows to obtain average costs of the users, being divided in the parts of the vehicle operating costs, the value of time, the accidents cost and, when applicable, the tolling costs.

The work here presented wants to validate a refinement proposed for the previous model through inclusion, in the model's calculation, in the additional costs of operation in vehicles, due to the evolution on time of the road pavement degradation, that is, due to the pavement condition.

Several models and studies are analyses and tested which consider the pavement condition as a factor that can influence the vehicle operating costs. Among the considered models and studies in the analysis, we must distinguish the formulation proposed for the Pavement Management System (SGP) of the Portuguese road network, a study developed by the "Transportation Research Board" and by the "American Society for Testing and Materials (TRB-ASTM)", the model JAE user's costs and the model of the user's cost of the World Bank (HDM-4).

The result of the analysis conducted to the checking and validation of the considered formulation. It was still carried out a practical application of this formulation to a Highway network and the obtained results point out for an additional cost for the users of approximately 3% (per cent) for pavement conditions that justify intervention operations in the network. This value can represent 6% (per cent) of additional cost for more advanced conditions of degradation.

## **Keywords**

Road Users Costs, Vehicle Operating Cost, Pavement Condition, Present Serviceability Index, International Roughness Index.



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento do Tema.....	1
1.2.	Objectivo do Trabalho e Metodologia Empregue.....	3
1.3.	Organização do Documento.....	4
2.	Custos dos utentes da Estrada.....	7
2.1.	Introdução .....	7
2.2.	Componentes consideradas na determinação dos custos dos utentes .....	9
2.2.1.	Custos de Operação dos Veículos .....	9
2.2.2.	Custos do Tempo de Percurso .....	21
2.2.3.	Custos dos Acidentes.....	21
2.2.4.	Custos de Portagem .....	22
2.2.5.	Custo do Desconforto .....	22
2.2.6.	Breve descrição dos Modelos existentes para determinação dos CUE.....	23
3.	Efeitos do estado dos pavimentos rodoviários nos custos de operação dos veículos ...	31
3.1.	Introdução .....	31
3.2.	Avaliação do estado dos pavimentos rodoviários .....	34
3.2.1.	Enquadramento .....	34
3.2.2.	Patologias dos pavimentos rodoviários .....	34
3.2.3.	International Roughness Index .....	39
3.2.4.	Metodologias de avaliação da qualidade dos pavimentos .....	43
3.2.5.	Present Serviceability Index .....	49
3.3.	Modelo de Cálculo dos custos médios de operação para a rede rodoviária portuguesa	51
3.3.1.	Formulação .....	51
3.3.2.	Informação necessária ao funcionamento do modelo.....	54
3.4.	Efeitos do estado dos pavimentos rodoviários no custo de operação dos veículos .....	57
4.	Avaliação dos custos adicionais de operação dos veículos devido ao estado dos pavimentos rodoviários .....	63
4.1.	Introdução .....	63

4.2.	Modelos para determinação dos custos adicionais de operação dos veículos.....	63
4.2.1.	Em função do PSI .....	64
4.2.2.	Em função do IRI.....	71
4.3.	Avaliação comparativa das formulações existentes .....	84
4.4.	Validação da Proposta de Formulação para a Rede Rodoviária Portuguesa.....	90
4.5.	Aplicação prática: Concessão Scutvias-A23 .....	95
5.	Conclusões e trabalho futuro.....	101
5.1.	Conclusões finais .....	101
5.2.	Recomendações para trabalhos futuros .....	103
6.	Referência Bibliográficas.....	105
	ANEXOS .....	111
	Anexo A - Quadros de introdução dos dados do modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4 para as situações estudadas.....	113
	Anexo B - Gráficos Custo vs Irregularidade obtidos pelo modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4 para as situações estudadas.....	127
	Anexo C - Cálculo dos Custos Médios dos Utenes da Estrada pelo Modelo Português de CUE para o ano de 2010 - Aplicação à Concessão Scutvias (A23) .....	133

## **Índice de Figuras**

Figura 2.1 - Esquema da distribuição da energia do combustível para um veículo em condições urbanas (a) e condições interurbanas (b), (TRB, 2006). .....	10
Figura 2.2 - Curvas de consumo de combustível versus velocidade para veículos ligeiros de passageiros (Santos et al, 2009a) .....	12
Figura 2.3 - Factores que influenciam o consumo de pneus (adaptado de Nortström e Andersson (1995) e citado em Bennett e Greenwood (2003) e Santos (2007)). .....	14
Figura 2.4 - Efeito da irregularidade no consumo de pneus em veículos ligeiros de passageiros (Bennett e Greenwood, 2003) .....	15
Figura 2.5 - Efeito da irregularidade no modelo de consumo de peças do HDM-III (Bennett e Greenwood, 2003) .....	18
Figura 2.6 - Efeito da irregularidade na utilização durante o tempo de vida pelo método do período de vida óptimo (Bennett e Greenwood, 2003) .....	19
Figura 2.7 - Exemplo do efeito da irregularidade nos Custos da desvalorização na Tailândia (Bennett e Greenwood, 2003) .....	20
Figura 2.8 - Elementos considerados na definição dos efeitos no utente da estrada do HDM-4 (adaptado de Bennett e Greenwood (2001) e citado em Santos (2007))......	24
Figura 2.9 - Processo de cálculo dos custos do utente do Modelo COBA (adaptado de COBA (2006) e citado em Santos (2007)) .....	25
Figura 2.10 - Processo de avaliação do programa COBA (adaptado de COBA (2006) e citado em Santos (2007)): .....	25
Figura 2.11 - Estrutura do sistema de custos (adaptado de Pereira e Miranda (1999) e citado em Santos (2007))......	27
Figura 2.12 - Coeficiente de variação dos custos de desvalorização (adaptado de Pereira e Miranda, 1999) .....	28
Figura 3.1 - Distribuição dos COV e CTP nos CUE, para os veículos ligeiros (Santos et al, 2009b) .....	31
Figura 3.2 - Distribuição dos COV e CTP nos CUE, para os veículos pesados de mercadorias (VPM) (Santos et al, 2009b) .....	32
Figura 3.3 - Caracterização da irregularidade longitudinal: (a) grandes comprimentos de onda; (b) pequenos comprimentos de onda (adaptado de Delanne, 1997).....	39

Figura 3.4 - Modelo matemático “quarto de veículo” utilizado na determinação do IRI (adaptado de ACPA, 2002) .....	41
Figura 3.5 - a) Perfilómetro Laser; b) Esquema de funcionamento de um Perfilómetro Laser (LNEC, 2007).....	42
Figura 3.6 - Desempenho do pavimento avaliando o índice de qualidade PSI .....	50
Figura 3.7 - Efeito da irregularidade nos custos de operação da Nova Zelândia (adaptado de Walls e Smith, 1998) .....	59
Figura 4.1 - Relação Factores de Correção do COV vs PSI do modelo UC-UM.....	65
Figura 4.2 - Factores de correção das componentes dos COV com o PSI do modelo TRB-ASTM, para VLP.....	68
Figura 4.3 - Factores de correção das componentes dos COV com o PSI do modelo TRB-ASTM, para VPM .....	69
Figura 4.4 - Relação factores de correção do COV vs PSI do modelo TRB-ASTM aplicado à rede rodoviária portuguesa.....	71
Figura 4.5 - Variação das componentes dos COV com o IRI no modelo de custos dos utentes da JAE .....	73
Figura 4.6 - Relação factores de correção do COV vs IRI do MC JAE aplicado à rede rodoviária portuguesa .....	74
Figura 4.7 - Relação factores de correção do COV vs IRI do modelo tailandês.....	77
Figura 4.8 - Menu inicial do programa do modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4, versão 2.00 (World Bank, 2010) .....	78
Figura 4.9 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VLP (Situação 1).....	80
Figura 4.10 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VPM (Situação 1).....	80
Figura 4.11 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VLP (Situação 2).....	80
Figura 4.12 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VPM (Situação 2).....	81
Figura 4.13 - Relação Factores de correção vs IRI do modelo do HDM-4 .....	83
Figura 4.14 - Relação factores de correção do COV vs PSI dos modelos estudados .....	84
Figura 4.15 - Factores de Correção do COV vs PSI dos modelos agregados estudados .....	85
Figura 4.16 - Relação factores de correção vs IRI para os modelos estudados.....	86

Figura 4.17 - Relação factores de correcção do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os VLP nos modelos estudados.....	87
Figura 4.18 - Relação factores de correcção do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os VPM nos modelos estudados .....	87
Figura 4.19 - Factores de correcção agregados do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI dos modelos estudados .....	90
Figura 4.20 - Relação Factores de Correcção do COV vs PSI para os modelos agregados que utilizam o PSI e para a Proposta de Formulação .....	93
Figura 4.21 - Relação Factores de Correcção do COV e CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os modelos estudados e para a proposta de formulação .....	94
Figura 4.22 - Variação dos COV e CUE com o estado do pavimento quantificado pelo PSI .....	99



## Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Matriz do impacto das componentes do custo do utente da estrada (adaptado de Anderson et al, 1992 e citado em Bennett e Greenwood, 2003).....	34
Quadro 3.2 - Famílias e tipos de degradações (1/2).....	37
Quadro 3.2 - (Continuação) Famílias e tipos de degradações (2/2) .....	38
Quadro 3.3 - Classificação das relações entre as degradações e os factores de degradação (Branco et al, 2008) .....	39
Quadro 3.4 - Quantificação do IRI na ausência de levantamento automático (adaptado de Picado-Santos et al, 2006) .....	43
Quadro 3.5 - Avaliação da qualidade dos pavimentos através do índice PSI (Paterson, 1987). 45	
Quadro 3.6 - Índice global PSI para cinco conjunturas de condições do pavimento .....	51
Quadro 3.7 - Componentes do modelo de COV proposto e impacto nos CUE (Santos, 2007)...	53
Quadro 3.8 - Parâmetros de entrada do modelo de CUE, Portugal (2006) (Santos et al, 2009b) .....	56
Quadro 3.9 - Análise da variabilidade dos parâmetros dos COV (Santos, 2007) .....	57
Quadro 3.10 - Efeitos da irregularidade do pavimento nos custos de operação (adaptado de Barnes e Langworthy, 2003) .....	60
Quadro 3.11 - Susceptibilidade das componentes dos COV a vários parâmetros (adaptado de Barnes e Langworthy, 2003) .....	61
Quadro 3.12 - Sensibilidade ao estado do pavimento e impacto das componentes nos COV dos VLP e VPM (dados 2007) .....	61
Quadro 4.1 - Variação do COV em relação ao PSI e respectivo Factor de Correção do modelo UC-UM.....	65
Quadro 4.2 - Factores de correcção do consumo das componentes dos COV em relação ao PSI/IQ (adaptado de ASTM, 1983 e de Zaniewski, 1983).....	68
Quadro 4.3 - Custo das componentes e respectiva percentagem nos COV para os VLP e VPM (adaptado de Santos, 2007).....	70
Quadro 4.4 - Variação do COV na rede rodoviária portuguesa em relação ao PSI e respectivo factor de correcção para os VLP e VPM obtidos por aplicação do modelo TRB-ASTM .....	71
Quadro 4.5 - Variação dos custos das componentes dos COV em relação ao IRI no modelo MC JAE (adaptado de GEPA, 1995) .....	72

Quadro 4.6 - Variação do COV em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM no modelo MC JAE .....	74
Quadro 4.7 - Variação do COV em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM no modelo Tailandês .....	76
Quadro 4.8 - Coeficientes polinomiais das equações das linhas de tendência obtidas pelo programa do HDM-4. ....	81
Quadro 4.9 - Variação dos CUE em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM nas situações 1 e 2 do modelo HDM-4 .....	82
Quadro 4.10 - Variação dos COV em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM nas situações 3 e 4 do modelo HDM-4 .....	82
Quadro 4.11 - Variação dos COV em relação ao PSI e respectivo factor de correcção para os modelos agregados estudados .....	85
Quadro 4.12 - Cálculo dos COV agregados em relação ao IRI para os modelos MC-JAE, Tailandês e situação 1 do HDM-4.....	88
Quadro 4.13 - Cálculo dos COV agregado em relação ao IRI para as situações 2, 3 e 4 do modelo HDM-4.....	89
Quadro 4.14 - Factores de correcção em relação ao IRI dos modelos agregados estudados ...	89
Quadro 4.15 - Determinação do Índice de Qualidade da rede rodoviária (dados obtidos em 2007 e 2008) (Trindade e Horta, 2009) .....	91
Quadro 4.16 - Factores de correcção para cenários de pavimentos Portugueses (adaptado de Santos et al, 2010).....	92
Quadro 4.17 - Dados de entrada do modelo específicos da concessão Scutvias.....	96
Quadro 4.18 - Dados de entrada do modelo sobre o custo dos acidentes (2010).....	96
Quadro 4.19 - Dados de entrada do modelo referente aos custos para as classes de veículos consideradas.....	97
Quadro 4.20 - Determinação dos CUE médios para a concessão Scutvias (2010).....	97
Quadro 4.21 - Análise da variação dos COV com o estado dos pavimentos quantificado pelo PSI, para a concessão Scutvias (2010).....	98
Quadro 4.22 - Análise da variação dos CUE devida ao estado dos pavimentos quantificado pelo PSI, para a concessão Scutvias (2010).....	99

## **Índice de Acrónimos**

AASHO - American Association of States Highway Officials  
ACPA - American Concrete Pavement Association  
AE - Auto -Estrada  
APL - Analyseur du Profil en Long  
ARFCOM - Australian Road Fuel Consumption Model  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
AT - Articulated Truck  
CA - Custos dos Acidentes  
CCo - Custo do Desconforto  
CEE - Comunidade Económica Europeia  
COBA - Cost Benefit Analysis  
COV - Custos de Operação dos Veículos  
CPortagem - Custo de Portagens  
CRRI - Central Road Research Institute  
CTP - Custos do Tempo de Percurso  
CUE - Custos dos Utentes das Estradas  
CVM - Contingent Valuation Method  
DMI - Distress Manifestation Index  
EN - Estrada Nacional  
EP, SA - Estradas de Portugal, SA (Instituto da Administração Central que gere a rede rodoviária portuguesa)  
ER - Estrada Regional  
EUA - Estados Unidos da América  
FC - Factor de Correção  
GEPA - Gestão de Pavimentos  
GPL - Gás Propano Liquefeito  
HB - Heavy Bus  
HDM - Highway Development and Management  
HT - Heavy Truck  
IC - Itinerário Complementar  
IEP - Instituto das Estradas de Portugal  
IP - Itinerário Principal  
IQ - Índice de Qualidade  
IRI - International Roughness Index  
ISOHDM - International Study of Highway Development and Management Tools  
JAE - Junta Autónoma de Estradas  
LB - Light Bus

LCCA - Life-Cycle Cost Analysis  
LDV - Light Delivery Vehicle  
LT - Light Truck  
MT - Medium Truck  
MB - Medium Bus  
MC - Modelo de Custos  
NBO - Notation par Bandes d'Ondes  
NPV - Net Present Value  
NZVOC - New Zealand Vehicle Operating Cost Model  
OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico  
PC - Passenger Car  
PCA - Portland Cement Association  
PCI - Pavement Condition  
PEM - Project Evaluation Manual  
PRN - Plano Rodoviário Nacional  
PSI - Present Serviceability Index  
PURD - Portable Universal Roughness Device  
PVC - Present Value of stream of Costs  
PVB - Present Value of a stream of Benefits  
RCR - Riding Condition Ratio  
RTIM - Road Transport Investment Model  
RUC - Road User Cost  
RUE - Road User Effects  
SCUT - Sem Custos para o Utilizador  
SGP - Sistema de Gestão de Pavimentos  
SAQ - Sistema de Avaliação da Qualidade  
TMDA - Tráfego Médio Diário Anual  
TMDA<sub>p</sub> - Tráfego Médio Diário Anual de veículos pesados  
TRB - Transportation Research Board  
TRL - Transport Research Laboratory  
UC - Universidade de Coimbra  
UM - Universidade do Minho  
VCL - Veículos Comerciais Ligeiros  
VLP - Veículos Ligeiros de Passageiros  
VOC - Vehicle Operating Costs  
VPM - Veículos Pesados de Mercadorias  
VPP - Veículos Pesados de Passageiros  
WTP - Willingness to Pay  
WTA - Willingness to Accept

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento do Tema

A rede rodoviária constitui sem dúvida a infra-estrutura de transportes mais importante para o desenvolvimento global de qualquer país (Branco et al, 2008). O facto de assegurar adequadas acessibilidades de pessoas e mercadorias a qualquer ponto do território, através de um conjunto de grandes eixos e vias que progressivamente apresentam menor importância, demonstra toda a sua importância para o desenvolvimento sócio-económico de um país. A rede rodoviária é ainda aquela que estabelece a ligação entre as diversas redes de transporte (ferroviárias, aéreas e marítimas), permitindo assim completar a cobertura de todo o território.

Os primeiros passos dados em direcção à formação de uma rede rodoviária portuguesa bem estruturada datam da publicação do Plano Rodoviário de Maio de 1945, do Regulamento das Estradas Nacionais de Abril de 1948 e dos Planos Gerais de Estradas da Madeira e dos Açores. A partir dessa altura, assistiu-se em Portugal a um grande desenvolvimento da rede, onde se foram construindo obras marcantes e se deu o lançamento da rede de auto-estradas (Branco et al, 2008).

A evolução verificou-se de uma forma mais notória a partir dos anos 80, com a definição do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN 85) (Decreto-Lei 380/85), que surgiu da necessidade de dar resposta ao desenvolvimento do país e a compromissos internacionais assumidos com a adesão à Comunidade Económica Europeia (CEE). Este plano reformulou profundamente a estrutura da rede rodoviária e a jurisdição sobre as vias (JAE, 1985). Passados mais de uma dezena de anos do PNR 85, assistiu-se à elaboração do Plano Rodoviário Nacional de 2000 (PRN 2000) (Decreto-Lei 222/98), que introduziu novas modificações (JAE, 1998). Este é ainda o actual plano orientador das obras em curso. Com a implementação destes planos, verificou-se um grande aumento de extensão da rede rodoviária nacional construída (Freitas e Pereira, 2001). Testemunho desta evolução tem sido o acréscimo da extensão da rede de auto-estradas nacional na última década, tornando Portugal num dos países com maior número de quilómetros de auto-estrada por habitante, na Europa.

No entanto, com a recessão económica actual, fruto da chamada “crise económica mundial”, e com a consolidação de toda a rede, tem sido notório um abrandamento desta fase de grande crescimento da rede rodoviária, nos últimos anos. Deste modo, é possível prever uma redução progressiva da qualidade global da rede e em especial dos seus pavimentos, conduzindo a uma necessidade crescente de se proceder, num futuro próximo, a investimentos em estratégias racionais de conservação e reabilitação dessa mesma rede

(Minhoto, 2005), as quais consistem basicamente na aplicação da “estratégia dos 3 C’s”: “o *tratamento Certo, na estrada Certa, no tempo Certo*” (FP, 2001).

De entre as várias componentes das construções rodoviárias, a da pavimentação é a que tem merecido uma atenção especial devido a diversos factores, entre os quais se destaca o grande peso desta componente no custo da construção rodoviária, o facto de a comodidade e segurança da circulação estar em grande parte associada pelos à qualidade da superfície do pavimento e ainda o facto de o tráfego em Portugal, tal como em muitos outros países, ter vindo sempre a aumentar em volume e nas cargas transportadas, exigindo pavimentos mais resistentes (Branco et al, 2008).

Tendo em conta os aspectos referidos, surgiu e tem sido desenvolvido ao longo das últimas décadas o conceito de “sistema de gestão” na área das actividades rodoviárias, tendo como principal objectivo distribuir os recursos disponíveis, em geral limitados, de modo a assegurar a prestação de um melhor serviço aos utentes em termos de segurança, economia e conforto ao longo de um determinado período de análise (Santos, 2007). Estes sistemas deram origem a diversas ferramentas de apoio à gestão, principalmente no domínio dos pavimentos rodoviários. Os Estados Unidos da América e o Canadá foram os pioneiros no desenvolvimento deste tipo de sistemas. A partir dos anos 80 começaram a ser desenvolvidos na Europa, apresentando desde logo uma preocupação com factores relacionados com a repercussão do estado dos pavimentos nos custos dos utentes.

A consideração dos custos e benefícios relacionados com os utentes torna-se assim de larga importância, pois são estes que sentem directa ou indirectamente a influência do estado de conservação da infra-estrutura. Contudo, muitas vezes estes custos não são considerados na análise de cenários e no planeamento de acções de conservação e reabilitação das infra-estruturas rodoviárias. O que geralmente se observa é a quantificação e consideração, nas análises económicas, dos custos de projecto, de construção e manutenção, carecendo da definição dos custos dos utentes. É de salientar ainda que o recurso a avaliações económicas e, por consequência, a consideração dos custos dos utentes da estrada, só se tornou comum nas últimas três décadas e nos países desenvolvidos, estando este facto relacionado com a imposição de regras por parte de organizações internacionais, como é o caso do Banco Mundial e da OCDE, para a execução destas avaliações como critério necessário à candidatura a empréstimos. Estas organizações sublinham a importância da consideração dos custos totais envolvidos, incluindo portanto os custos dos utentes, na tomada de decisão sobre políticas de preços em transportes.

Deste modo, foi dado um impulso à criação de ferramentas e métodos que, de uma forma simples mas credível, permitissem a inclusão dos custos dos utentes nos processos de gestão da estrada, em particular na fase de planeamento de projectos de conservação dos pavimentos em áreas que apresentem elevados volumes de tráfego, devido ao elevado

potencial de virem a ocorrer grandes custos associados ao tempo perdido pelos utentes (Santos, 2007).

A consideração, nestas ferramentas de cálculo dos custos dos utentes, do efeito que a qualidade dos pavimentos pode ter, de maneira particular nos custos de operação dos veículos já que são estes os mais afectados pelo estado de conservação dos pavimentos, e de maneira geral nos custos dos utentes, tornasse assim, economicamente, uma matéria de muito interesse. A quantificação destes efeitos conduz à obtenção de diversos benefícios, já que promove uma actuação prévia na rede, evitando a degradação extrema dos pavimentos, e por outro lado previne intervenções de conservação mais onerosas e custos adicionais para os utentes. Este trabalho contribui exactamente para esse objectivo.

## **1.2. Objectivo do Trabalho e Metodologia Empregue**

Os Custos dos Utentes da Estrada (CUE) são a componente de custos mais difícil de quantificar na avaliação dos custos de ciclo de vida de uma infra-estrutura rodoviária. No entanto, uma adequada gestão deste tipo de infra-estruturas, desde a fase de planeamento e construção até à manutenção e exploração da rede, exige uma abordagem rigorosa com a consideração das diferentes componentes de custos envolvidas, incluindo, claro está, os custos dos utentes.

Entre os anos de 2004 e 2008, foi desenvolvido em duas Universidades Portuguesas (Beira Interior e Coimbra), um trabalho de doutoramento que teve como finalidade contribuir para a implementação de sistemas de gestão de infra-estruturas rodoviárias de qualidade, através da definição de um Modelo de Custos dos Utentes das Estradas com aplicação à rede rodoviária nacional (Santos, 2007).

A inexistência de modelos adequados à realidade nacional e o facto de a administração rodoviária Portuguesa não considerar os custos dos utentes na avaliação de projectos e na gestão deste tipo de infra-estruturas, foram os principais fundamentos que levaram à realização desta investigação.

A criação desta ferramenta permitiu assim a inclusão, ao nível da rede rodoviária nacional, dos custos dos utentes na gestão da rede rodoviária, servindo de apoio à actividade dos técnicos e gestores das redes e possibilitando a análise de estratégias de conservação de pavimentos que conduzam a soluções mais amplas. Ao considerar estes custos permitiu também melhorar a qualidade de serviço prestado aos utentes e consequentemente o grau de satisfação dos mesmos.

Através do modelo de custos dos utentes alcançado, foi assim possível a determinação das parcelas dos custos médios de operação dos veículos, do tempo de percurso, dos acidentes e quando aplicável, das portagem reais ou virtuais.

O trabalho que aqui se apresenta tem como objectivo validar uma formulação proposta para a consideração e inclusão no modelo de CUE acima referido, dos custos adicionais de operação dos veículos devidos à evolução das degradações com o tempo das características dos pavimentos rodoviários, tendo por base o estado da arte a nível nacional e internacional.

A metodologia adoptada consiste primeiramente em avaliar a influência do estado dos pavimentos nas diversas componentes dos custos de operação (combustível, pneus, manutenção e desvalorização), identificando as mais susceptíveis, através da análise de diversos estudos e modelos de cálculo de custos dos utentes. Com estes dados são posteriormente efectuados estudos comparativos, através da análise de vários cenários, que permitirão uma melhor descrição, discussão e validação da proposta de formulação a incluir no modelo de CUE português para consideração do efeito do estado dos pavimentos. Para finalizar é efectuada uma aplicação prática da formulação proposta a uma rede rodoviária concessionada.

### **1.3. Organização do Documento**

O trabalho desenvolvido neste documento é constituído por cinco capítulos, uma parte referencial e uma secção de anexos.

Neste primeiro capítulo (Introdução) é efectuado o enquadramento do tema deste documento, abordando-se a importância da manutenção de níveis adequados de qualidade dos pavimentos rodoviários e enquadrando o contexto da necessidade de aperfeiçoar a estimação dos custos rodoviários, em particular os Custos dos Utentes da Estrada (CUE). São ainda descritos os principais objectivos a atingir com o trabalho desenvolvido e respectiva metodologia empregue, assim como uma descrição sumária dos conteúdos apresentados em cada capítulo.

No capítulo 2 abordam-se de uma forma geral os CUE, descrevendo as diversas parcelas de custos que os compõem, recaindo a ênfase principal nos Custos de Operação dos Veículos (COV), já que constituem a parcela mais influenciada pelo estado dos pavimentos. É ainda apresentada uma breve descrição de alguns dos modelos em uso para determinação dos custos dos utentes da estrada.

A contribuição da parcela dos COV nos custos dos utentes e a influência do estado dos pavimentos nos COV são os assuntos abordados no início do capítulo 3. Posteriormente, é feita referência às diversas patologias que podem surgir nos pavimentos rodoviários e às metodologias de avaliação da qualidade dos pavimentos, definindo-se ainda o significado de índices como o “International Roughness Index” (IRI) e o “Present Serviceability Index” (PSI). No fim do capítulo é apresentada a formulação do modelo português de CUE para cálculo dos COV e ainda a susceptibilidade de cada componente dos COV ao estado dos pavimentos rodoviários.

No capítulo 4 é apresentada a análise efectuada aos modelos e estudos existentes e em uso que contemplam na sua formulação de cálculo dos COV a variação devida ao estado dos pavimentos, sendo separados pelos que consideram este efeito através do PSI e através do IRI. De seguida é efectuada uma avaliação comparativa das formulações existentes, cujos resultados culminam com a comparação e validação a uma proposta de formulação para a rede nacional elaborada por um grupo de investigadores. Na parte final do capítulo é ainda apresentada uma aplicação prática da formulação validada a uma rede rodoviária concessionada (Scutvias), constituindo o caso de estudo.

O quinto e último capítulo é dedicado à enumeração das principais conclusões obtidas com a realização do trabalho, indicando-se ainda algumas recomendações para trabalhos futuros.

Para concluir o trabalho é apresentada a parte referencial onde estão citadas todas as referências bibliográficas utilizadas, finalizando o documento com a secção de Anexos, que reúne informações de cálculo que serviram de apoio à execução do trabalho.



## 2. Custos dos utentes da Estrada

### 2.1. Introdução

Qualquer projecto de engenharia não pode ser avaliado, quanto à sua viabilidade, considerando apenas o seu custo inicial, ou seja, o custo associado ao projecto e à implantação de uma dada obra no ano “zero”. A análise económica deve incidir também noutros factores, como por exemplo, a consideração dos custos ao longo de um determinado período de vida útil. A construção de uma estrada não é excepção a esta regra.

Uma maneira de quantificar a totalidade dos custos e realizar uma análise económica (o mais aproximada possível) sobre determinado projecto é através de uma análise do custo do ciclo de vida: LCCA - “Life-Cycle Cost Analysis”. Esta análise é aplicada a diversos tipos de infra-estruturas e, nomeadamente nas estradas, tem em conta determinados custos: os de implantação da estrada, os inerentes à sua manutenção ao longo do tempo e ainda os benefícios que se podem retirar da sua utilização. No sector rodoviário, os pavimentos constituem o aspecto mais importante em termos de conservação e manutenção da infra-estrutura. Os custos associados à sua gestão são significativos e podem ser divididos em dois grupos principais: os custos da administração e os custos dos utentes da estrada (CUE). Os custos da administração podem ser divididos ainda em diferentes componentes, (Branco et al, 2008):

#### ***Custos de Projecto***

Estão relacionados com todos os custos que resultam do projecto, incorporando os custos de obtenção de dados, tais como os relativos à caracterização do tráfego actual e futuro, e à caracterização do pavimento existente. Este tipo de custos tem um peso relativamente pequeno no conjunto dos custos verificados ao longo do ciclo de vida de uma infra-estrutura rodoviária.

#### ***Custos de Construção***

Referem-se ao investimento inicial com a construção do novo pavimento. Nos casos em que a análise incide em estratégias alternativas de conservação de pavimentos não é, em princípio, necessário considerar esta componente de custos pois entra no âmbito dos custos de conservação.

#### ***Custos de Conservação***

Este tipo de custos tem em conta todas as acções de conservação realizadas ao longo da vida do pavimento, cujo objectivo é o de manter o pavimento acima de um determinado nível de qualidade, ou manter a qualidade do pavimento com um determinado nível limite de

degradação. Estas acções podem ser de dois tipos: a conservação corrente que tem como objectivo corrigir certas deficiências do pavimento à medida que elas vão aparecendo, reabilitando assim o pavimento; e a conservação periódica, consistindo num conjunto de acções a executar em certos períodos da vida do pavimento, com a finalidade de recuperar certas características (estruturais ou funcionais), ou apenas para reduzir a taxa de degradação do pavimento (conservação preventiva).

### **Valor Residual**

É o custo, correspondente ao valor que o pavimento apresenta, do ponto de vista funcional e estrutural, quando chega ao fim do seu período de vida. Este valor pode ser obtido pela diferença entre o custo do pavimento inicial e o custo da reabilitação do pavimento existente de maneira a que apresente características idênticas às iniciais. Este valor residual é também apresentado como custo negativo.

Por outro lado, os custos para os utentes da estrada são todos os custos que influenciam directa ou indirectamente, em termos monetários, o utente que percorre uma determinada secção de uma estrada. Podem ser definidos como as despesas de operação do veículo para percorrer uma determinada extensão de uma estrada, os valores do tempo de percurso gasto pelo condutor e passageiros, assim como os custos dos acidentes para a secção considerada, podendo também existir um custo associado às portagens.

Para um melhor entendimento do que implica a designação “custo do utente” importa clarificar o conceito de “utente”. Assim, “utente” é entendido como aquele que utiliza um serviço público que é pago por este de uma forma indirecta, ou seja, é considerado um utilizador contribuinte do Estado, que financia o funcionamento e a prestação do serviço público da infra-estrutura rodoviária, tendo por isso legitimidade para exigir rigor na distribuição do seu dinheiro e qualidade na prestação do serviço que está a usufruir (Santos, 2007).

Tal como nos custos da administração, os custos dos utentes também são divididos em várias componentes, sendo as mais comuns:

- Custos de Operação dos Veículos (COV);
- Custos do Tempo de Percurso (CTP);
- Custos dos Acidentes (CA);
- Custos de Portagens (CPortagem);
- Custos do Desconforto (CCo).

As componentes dos CUE são, em geral, de determinação mais difícil em relação às componentes consideradas no primeiro grupo de custos (custos da administração), estando todas, em graus diferentes, dependentes do estado dos pavimentos da rede rodoviária (Branco et al, 2008). Cada uma destas componentes será descrita e caracterizada nos itens

seguintes deste capítulo, bem como apresentadas algumas metodologias existentes que as permitem quantificar.

## **2.2. Componentes consideradas na determinação dos custos dos utentes**

### **2.2.1. Custos de Operação dos Veículos**

Os custos de operação dos veículos são função do tipo e estado de conservação do veículo, do tipo e da irregularidade da camada de desgaste do pavimento, da velocidade de circulação e das características geométricas da estrada (Santos, 2007). Este tipo de custos representa a maior contribuição para os custos totais suportados pelos utentes e constitui a componente mais estudada e a mais utilizada na definição destes custos.

Geralmente, os COV compreendem os custos do combustível, pneus, óleo, manutenção (peças e mão-de-obra), reparação e desvalorização dos veículos. Destes factores, o preço dos combustíveis assume-se como a variável que tem sofrido maiores alterações nos últimos tempos. Alguns autores, ou mesmo metodologias de cálculo, referem que os COV podem ser decompostos em duas componentes (Rodrigues, 2007):

- Custos relacionados com o consumo de combustível (“fuel”);
- Custos relacionados com a utilização do veículo (“non fuel”), ou seja, ligados aos restantes consumíveis, como por exemplo: óleo, pneus, manutenção, reparação e desvalorização dos veículos.

Para avaliar a possibilidade da ocorrência de custos adicionais nos COV devido ao estado em que se encontram os pavimentos de uma rede, é fundamental aprofundar a análise e o conhecimento das componentes que compõem este tipo de custos.

### ***Combustível***

Para o seu funcionamento, os veículos não dispõem a utilização de combustíveis como o gasóleo (ou diesel) ou a gasolina. Estes permitem a deslocação e mobilidade de pessoas e bens, mas originam simultaneamente resíduos e emissões de gases como o dióxido de carbono. Embora actualmente os principais combustíveis utilizados sejam a gasolina e o gasóleo, existem veículos com motores que funcionam com outras formas de energia como a gás propano liquefeito (GPL), o biogás, o gás natural e mais recentemente veículos com motores eléctricos alimentados por baterias.

O consumo de combustível é uma componente bastante significativa dos COV, representando geralmente entre 20 e 40% do total dos COV (HTC, 1999).

A energia obtida a partir do consumo de combustível por um veículo é utilizada para vencer uma variedade de adversidades (Bennett e Greenwood, 2003). Do total do combustível consumido, mais de 60% da energia é gasta na forma de calor através do sistema de refrigeração e através da libertação de gases pelo escape dos veículos. Somente cerca de 19% do total da energia do combustível é utilizada para mover o veículo ao longo da estrada sob condições tipicamente urbanas. Já para as condições interurbanas, esta percentagem é superior, representando mais de 25%, muito devido à redução da componente de “espera” (veículo parado e em ponto morto). A figura 2.1 apresenta a distribuição típica da energia do combustível para as condições urbanas e interurbanas.

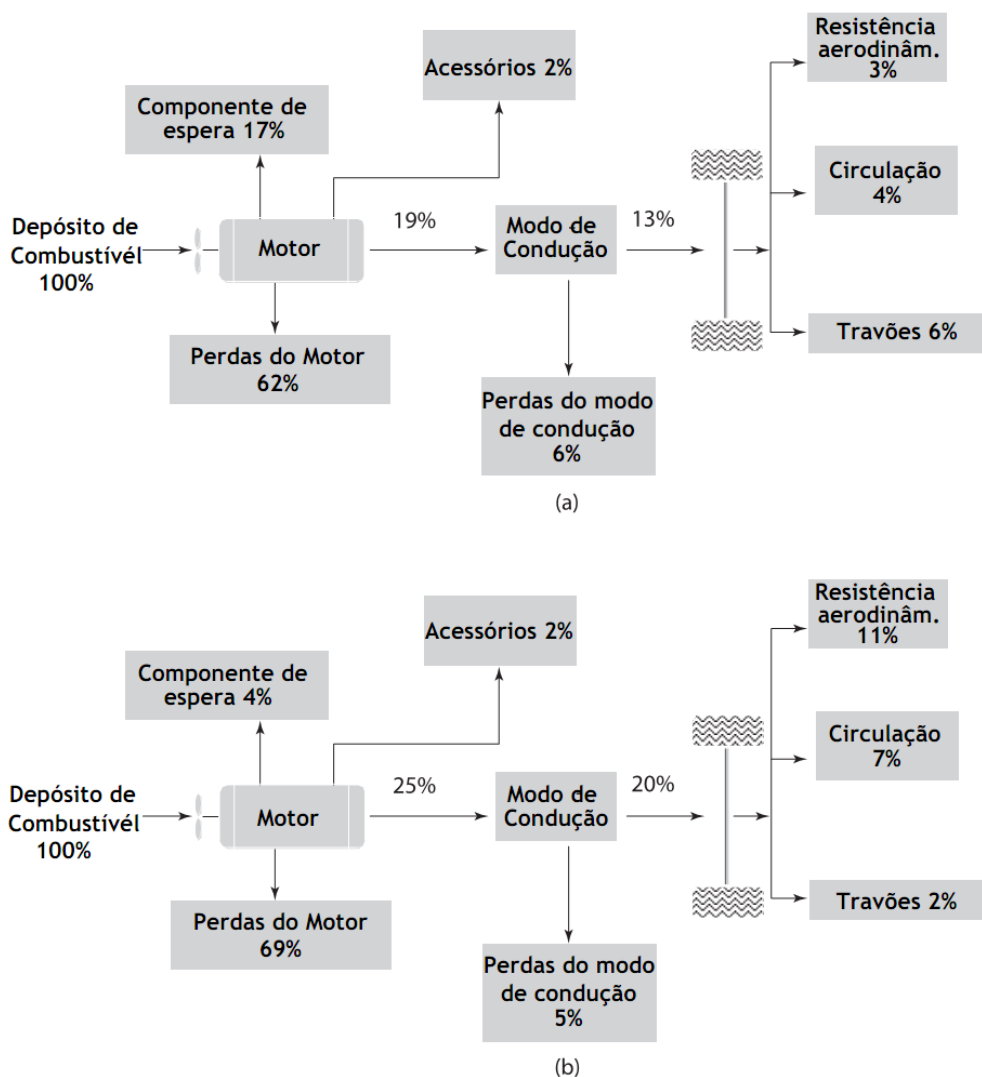


Figura 2.1 - Esquema da distribuição da energia do combustível para um veículo em condições urbanas (a) e condições interurbanas (b), (TRB, 2006).

O consumo de combustível pode ser quantificado de dois modos: em mL/s (mililitros por segundo) ou em L/1000km (litros por cada 1000km). O primeiro corresponde ao consumo instantâneo de combustível, sendo que pode ser convertido em consumo específico (segundo modo) dividindo o consumo instantâneo pela velocidade do veículo (em m/s). O consumo instantâneo de combustível é usado no modelo do HDM-4 do Banco Mundial (Bennett e

Greenwood, 2003), no entanto é convertido em consumo específico já que esta unidade é mais utilizada na tomada de decisões de investimento rodoviário.

O consumo de combustível é influenciado por diversos factores: a estrada, os veículos e o próprio condutor.

A estrada possui um conjunto de características que, ao serem alteradas, podem afectar as forças que se opõem ao movimento dos veículos, tendo efeito no consumo de combustível (Bennett e Greenwood, 2003). As principais características da estrada que influenciam o consumo estão relacionadas com o seu alinhamento e com as condições de circulação que apresenta, nomeadamente associadas a:

- Inclinações e curvaturas adoptadas no traçado geométrico;
- Irregularidade, textura e rugosidade dos pavimentos;

Também as condições de tráfego, ou seja, a existência ou não de congestionamentos numa determinada secção de estrada, originam uma mudança na taxa de consumo de combustível de um veículo. No entanto, neste documento, dá-se especial realce ao estado dos pavimentos e conseqüentemente à sua irregularidade como factor que pode resultar num custo adicional nos COV, pelo que será abordado essencialmente este último aspecto.

Os veículos e as suas características têm também um peso considerável no consumo de combustível. Factores como a massa do veículo, o tamanho, a área frontal, o tipo de motor e de pneus desempenham um papel significativo no total do combustível consumido (Bennett e Greenwood, 2003).

No que concerne aos condutores, o estilo de condução praticado, incluindo a velocidade adoptada, tem uma profunda influência sobre a taxa de consumo de combustível. No entanto, este é um factor de difícil modelação e quantificação. A figura 2.2 ilustra várias relações entre a velocidade adoptada e a média de combustível consumido, obtidas a partir da aplicação de três modelos existentes para veículos ligeiros de passageiros.

Esta relação velocidade versus consumo de combustível apresenta uma forma em “U”, onde os consumos de combustível são mais acentuados para velocidades baixas e elevadas e verificando-se os consumos mais económicos para velocidades entre 40 e 60 km/h. A razão da forma ser em U pode ser explicada ao se considerarem os dois extremos de velocidades. A velocidades elevadas as forças aerodinâmicas, que estão relacionadas com o quadrado da velocidade, tornam-se dominantes exigindo consumir grandes quantidades de combustível. A velocidades baixas, requerendo menor potência de tracção por parte do veículo, o consumo de combustível está relacionado principalmente com o facto de se ter que “arrastar” o motor e os acessórios não havendo forças aerodinâmicas consideráveis que ajudem nesse movimento (Bennett e Greenwood, 2003).

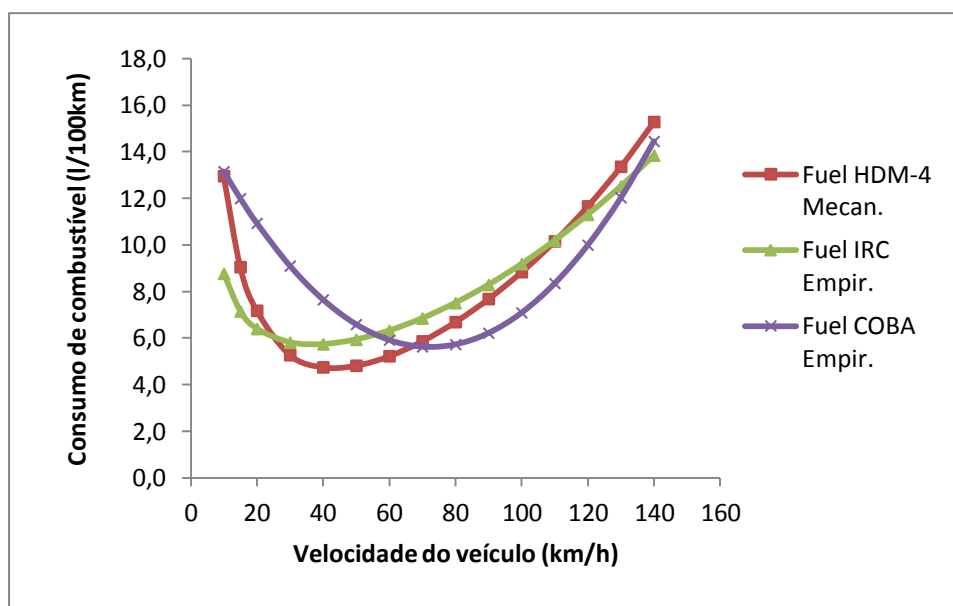


Figura 2.2 - Curvas de consumo de combustível versus velocidade para veículos ligeiros de passageiros (Santos et al, 2009a)

O consumo de combustível de um veículo pode ser estimado através de modelos de cálculo empíricos ou mecanicistas.

Segundo Bennett e Greenwood, 2003, numa primeira fase da investigação do consumo de combustível, os investigadores utilizavam dados empíricos “grosseiros” e pouco confiáveis, sendo depois substituídos por estudos experimentais que relacionavam o consumo de combustível às condições específicas de operação, modelando-o através de uma abordagem empírica. Assim, os primeiros modelos empíricos relacionavam o consumo de combustível principalmente com a velocidade do veículo, permitindo descobrir a relação em forma de “U”, descrita acima, entre estes dois parâmetros.

Mais recentemente, o consumo de combustível tem sido modelado usando princípios mecanicistas relacionando o consumo com as forças opostas ao movimento. De tal modo, ao quantificar a magnitude das forças que se opõem ao movimento, pode estabelecer-se o consumo de combustível. Este tipo de modelo são melhores que os empíricos, já que permitem efectuar alterações nas características dos veículos e são mais flexíveis, podendo ser aplicados a diferentes condições. Um dos modelos mecanicistas mais abrangentes de consumo de combustível é o Modelo australiano ARFCOM (“Australian Road Fuel Consumption Model”) (Biggs, 1988). Neste modelo considera-se o consumo de combustível proporcional à potência total requerida para o andamento do veículo que assenta na obtenção das forças de tracção, da força requerida para o funcionamento dos acessórios e da fricção interna do motor.

Em suma, o consumo de combustível é a componente mais significativa dos COV e aquela que mais tem sido alvo de estudos. Este é, portanto, um factor bastante sensível a muitas das decisões de investimento na rede rodoviária.

### **Óleo**

O óleo é um lubrificante que tem como objectivo reduzir o desgaste causado pelo atrito provocado pelos componentes do motor em movimento e retirar partículas nocivas ao motor. A mudança de óleo frequente e a verificação regular do seu nível, são essenciais para a manutenção do motor em boas condições, aumentando o tempo de vida do motor do veículo.

O consumo de óleo constitui uma das componentes com menos significado no total dos COV. Devido a este facto, o consumo de óleo não tem merecido o mesmo pormenor de pesquisa e de investigação em relação a outras componentes dos COV, conduzindo até à sua não consideração em muitos modelos de custos dos utentes.

O consumo de óleo resulta de dois factores (Bennett e Greenwood, 2003): a contaminação de óleo e as perdas de óleo. A primeira ocorre devido a impurezas resultantes do processo de combustão ou provenientes de fontes exteriores, como as poeiras em estradas não pavimentadas, o que faz com que se tenha de efectuar mudanças de óleo nos veículos ao fim de uma certa quantidade de quilómetros percorridos. Já as perdas de óleo ocorrem quando o óleo escapa por entre selagens defeituosas ou pelo processo de combustão, em que o óleo pode escapar pelos pistões e ser queimado juntamente com o combustível.

No último terço do século passado foram feitos alguns estudos com o intuito de prever o consumo de óleo dos veículos, entre os quais, alguns que incluíam na sua modelação a questão da irregularidade. O “Road User Cost Study in India” (CRRI, 1982) foi um dos estudos importantes na definição do consumo de óleo. Este pretendeu relacionar o consumo de óleo com as condições de operação dos veículos, resultando na elaboração de várias equações que relacionavam o consumo de óleo com parâmetros geométricos da estrada como a inclinação, a largura e a irregularidade. Também Watanatada et al. (Watanatada et al, 1987) propuseram um modelo de consumo de óleo para o HDM-III, onde a irregularidade era incluída na modelação. Um outro estudo elaborado por Pienaar (Pienaar, 1984) permitiu concluir, através de experiências com veículos na Nova Zelândia, que as perdas de óleo eram função da velocidade do motor e proporcionais ao consumo de combustível.

### **Pneus**

Os pneus são uma componente significativa dos custos de operação dos veículos, principalmente no caso dos veículos pesados. Além disso é uma das componentes mais difíceis de determinar.

Um pneu é essencialmente constituído pelo piso e pela carcaça. O piso é a parte do pneu concebida para estar em contacto com o solo, proteger a carcaça contra o desgaste mecânico e contribuir para a aderência do pneu ao solo. A carcaça é a parte estrutural do pneu, excluindo o piso e as paredes laterais de borracha, que suporta a carga quando o pneu se encontra insuflado.

À medida que o veículo se movimenta, os pneus desgastam-se continuamente. Este desgaste ocorre especialmente de duas formas (Bennett e Greenwood, 2003):

- Desgaste do piso: desgaste do piso do pneu devido ao contacto deste com a superfície do pavimento;
- Desgaste da carcaça: é a combinação de um dano por fadiga e um dano mecânico na carcaça do pneu; é definido como o número de recauchutagens (processo de colocação de um novo piso num pneu) que a carcaça suporta antes de se tornar inapropriada para a recauchutagem.

Os furos e dilacerações (cortes) nos pneus, que levam à rotura do piso do pneu e que são causadas por materiais que se encontram na superfície das estradas, são também factores importantes ao definir o tempo de vida dos pneus.

A recauchutagem de um pneu é um aspecto muito importante e a ter em conta na modelação dos custos dos pneus pois esta é uma prática comum em muitos países.

O consumo de pneus é influenciado por diversos factores. Na figura 2.3 são apontados alguns dos principais factores do consumo de pneus sendo referidas duas componentes principais de factores: as que influenciam a taxa de desgaste por unidade de energia e as que impõem a energia que chega ao pneu.

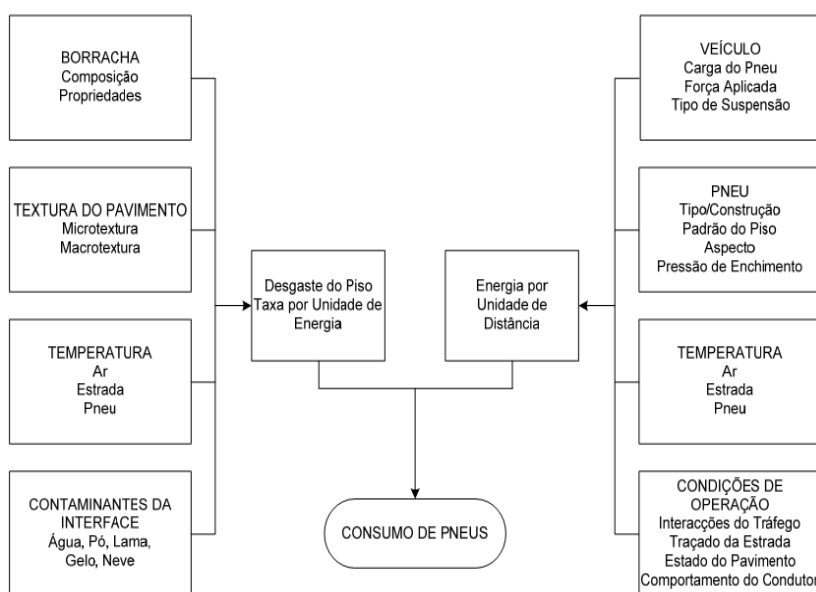


Figura 2.3 - Factores que influenciam o consumo de pneus (adaptado de Nortström e Andersson (1995) e citado em Bennett e Greenwood (2003) e Santos (2007)).

Dos principais factores apontados na figura realçam-se os seguintes: estado do pavimento, traçado da estrada, condições do tráfego, carga do veículo, clima e propriedades do pneu. Destes, o factor que mais interessa para este trabalho é sem dúvida o estado dos pavimentos. Assim sendo, com o aumento da irregularidade aumenta o consumo de pneus pois, quando a irregularidade é acentuada, a carga vertical imposta aos pneus aumenta. A figura 2.4 mostra o efeito da irregularidade do pavimento no consumo de pneus de veículos ligeiros de passageiros para diferentes estudos, realizados em diferentes países, nomeadamente no Brasil, na Índia, nas Caraíbas e no Quênia, na década de 80 do século passado. É possível verificar em todos os países um aumento do consumo de pneus com o aumento da irregularidade do pavimento. O facto das relações irregularidade/consumo de pneus diferirem de país para país pode estar relacionado com a utilização de diferentes tipos de pneus nos países considerados no estudo, e ainda por alguns países apresentarem pavimentos em condições de maior degradação que outros.

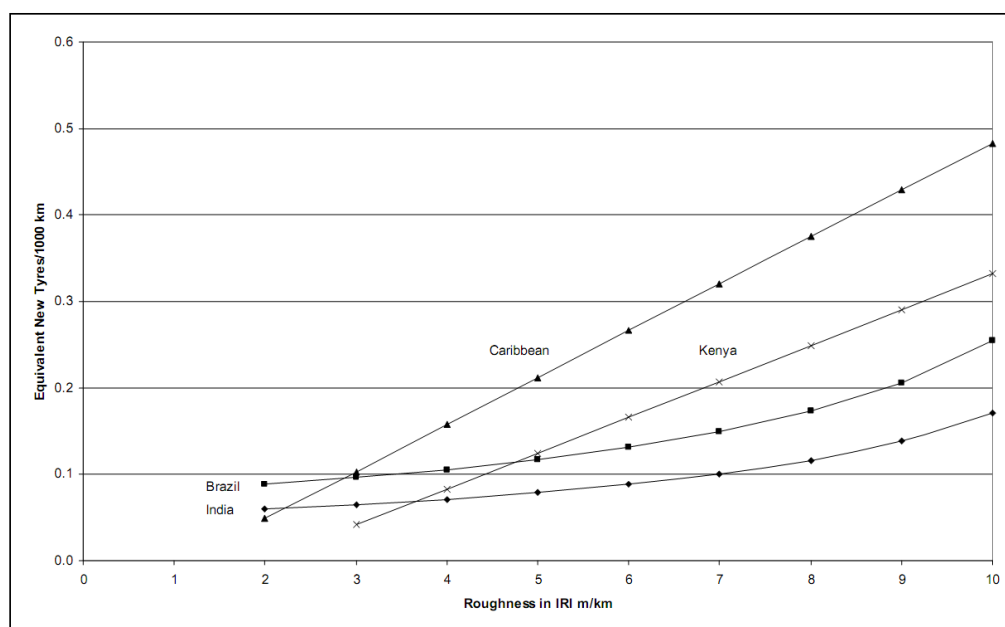


Figura 2.4 - Efeito da irregularidade no consumo de pneus em veículos ligeiros de passageiros (Bennett e Greenwood, 2003)

Outros factores importantes relativos ao estado dos pavimentos e que devem ser considerados no consumo de pneus são o tipo de superfície e o estado em que se encontra a sua textura.

Vários estudos elaborados no passado comprovam o aumento do consumo de pneus devido ao estado dos pavimentos. Claffey (Claffey, 1971) realizou um estudo onde se verificou que o consumo de pneus era 75% maior para os pavimentos betuminosos em relação aos pavimentos rígidos. Também Chesher e Harrison (Chesher e Harrison, 1987) estudaram a influência da irregularidade longitudinal no tempo de vida dos pneus, chegando à conclusão que um aumento na irregularidade leva a um aumento no consumo de pneus.

Relativamente à modelação do consumo de pneus, esta tem assentado em duas abordagens (Bennett e Greenwood, 2003):

- Experiências controladas: onde o consumo de pneus é medido com um elevado grau de exactidão num pequeno número de pneus;
- Inquéritos a frotas de veículos: onde o consumo de pneus de frotas de veículos é monitorizado.

No entanto, estas abordagens são difíceis de realizar ou implementar com a exactidão pretendida. No seguimento destas duas abordagens têm vindo a ser desenvolvidos dois modelos de previsão do consumo de pneus (Bennett e Greenwood, 2003):

- Modelos Mecanicistas: aqueles que relacionam o consumo de pneus com as equações fundamentais do movimento e que geralmente são desenvolvidos a partir de experiências controladas;
- Modelos Empíricos: modelos mais globais, desenvolvidos em geral a partir da informação obtida nos inquéritos efectuados às frotas.

Os mesmos autores referem que os modelos empíricos são os que têm melhor desempenho na modelação do consumo de pneus pois associam as políticas de pneus implementadas pelos operadores. Contudo, os modelos mecanicistas são vantajosos na medida em que são capazes de responder, de uma forma teoricamente robusta e consistente, a uma vasta gama de condições de operação encontradas pelos veículos.

É de notar ainda que, qualquer que seja o modelo utilizado, é essencial que os pneus recauchutados sejam considerados. Geralmente, estes custam menos e podem exibir propriedades de desempenho diferentes relativamente aos pneus novos, sendo comuns em alguns países.

### ***Manutenção e Reparação de Veículos***

A manutenção é um aspecto importante a ter em conta durante a vida do veículo, para que este tenha ao longo da sua utilização um comportamento eficaz em termos de rendimento energético, impactos ambientais e segurança.

Os custos de manutenção e reparação, ou apenas custos de manutenção, como normalmente se designam, são organizados em duas componentes: o custo associado ao consumo de peças e o custo relativo às horas de mão-de-obra.

Estes custos são geralmente uma das parcelas mais significativas em termos da quantificação dos benefícios que advêm da realização de melhoramentos na estrada, como é o caso da melhoria do estado dos pavimentos. Segundo avaliações de benefícios efectuadas com o HDM-III, estes valores podem representar cerca de 80% para determinados projectos (Bennett e Greenwood, 2003). No entanto, apesar da importância deste tipo de custos para a

determinação dos COV e para as análises económicas, poucos estudos foram desenvolvidos sobre esta componente.

Os custos de manutenção são os únicos considerados nos COV que apresentam dificuldades ao nível da sua medição empírica e previsão devido a vários factores intervenientes. Como por exemplo aponta-se o facto de as práticas dos donos dos veículos ter uma influência significativa nestes custos e estes poderem variar para veículos semelhantes de diferentes fabricantes.

Os modelos de custos de manutenção funcionam tentando traduzir a realidade de dois tipos de operadores: aqueles que despendem poucos recursos na manutenção mas verificam taxas de desvalorização elevadas e, pelo contrário, os operadores que implementam políticas de manutenção preventiva aumentando o período de vida dos veículos e reduzindo a taxa de desvalorização. No entanto, os resultados obtidos por estes modelos são susceptíveis a factores que alterem os resultados, nomeadamente os diferentes períodos de garantia que variam de país para país, regras de taxaço e desvalorização, mão-de-obra própria não incluída totalmente ou parcialmente nas operações de reparação e diferenças regionais nos custos de manutenção e reparação, devidas particularmente ao custo de mão-de-obra (Santos, 2007)

Devido a estes factores, a prática tem sido a de separar a determinação dos custos de consumo de peças e de mão-de-obra.

Como estudos mais importantes efectuados nesta área salientam-se o modelo de manutenção do HDM-III (Watanatada et al, 1987), o modelo de manutenção do RTIM3 (“Road Transport Investment Model”, versão 3) (Cundill, 1993) e investigações feitas nos Estados Unidos e na África do sul.

O modelo de manutenção do HDM-III permite estimar os custos de manutenção através da utilização de equações que derivam de estudos efectuados no Brasil, Índia, Quénia e Caraíbas. As equações utilizadas no modelo brasileiro de determinação do consumo de peças são função do IRI, considerando assim a irregularidade longitudinal do pavimento.

A figura 2.5 apresenta as previsões do modelo de consumo de peças do HDM-III para veículos com 100000km percorridos (Bennett e Greenwood, 2003). Observa-se que há uma diferença significativa nos efeitos previstos da irregularidade entre as diferentes classes de veículos. Os veículos ligeiros e de mercadorias (PC e LDV na figura) são muito sensíveis à irregularidade, especialmente acima do IRI de 6m/km, enquanto os veículos pesados de passageiros são menos sensíveis à irregularidade. A sensibilidade dos veículos ligeiros e de mercadorias à irregularidade tem sido motivo de preocupação para os analistas, tendo verificado Bennett (Bennett, 1995), por exemplo, que um aumento da irregularidade de 2 para 10m/km resulta

num factor de aumento no consumo de peças de 4.1 para veículos ligeiros e de apenas 1.5 para os pesados de passageiros.

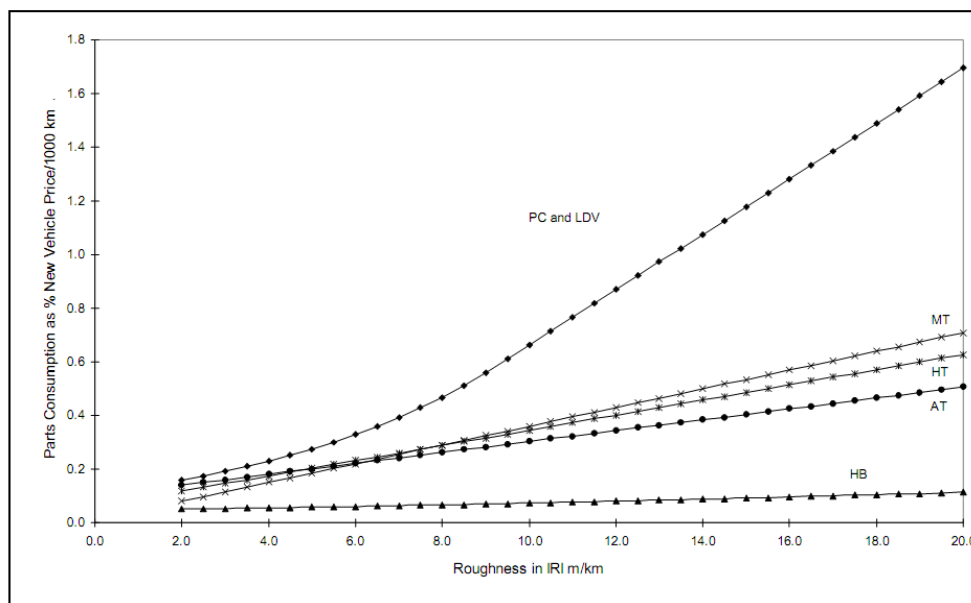


Figura 2.5 - Efeito da irregularidade no modelo de consumo de peças do HDM-III (Bennett e Greenwood, 2003)

Onde:

PC - Veículo Ligeiro de Passageiros (Passenger Car);

LDV - Veículo Ligeiro de Mercadorias (Light Delivery Vehicle);

MT - Veículo Pesado Médio de 2 eixos (Medium Truck);

HT - Veículo Pesado com multi-eixos (Heavy Truck);

AT - Veículo Pesado Articulado (Articulated Truck);

HB - Veículo Pesado de Passageiros com multi-eixos (Heavy Bus).

### Desvalorização dos Veículos

Todos os veículos se vão desvalorizando ao longo do tempo. Entende-se por desvalorização de um veículo a perda de valor deste que não pode ser reposta por via de operações de reparação ou manutenção (Bennett e Greenwood, 2003). A desvalorização de um veículo depende essencialmente do uso do veículo, do tempo e da tecnologia obsoleta (tecnologias dos veículos que caíram em desuso ou que foram substituídas por novas tecnologias).

No que diz respeito à determinação dos custos de desvalorização, existem várias técnicas que têm sido usadas podendo ser agrupadas em quatro componentes (Bennett e Greenwood, 2003):

- Valor-Idade;
- Capital Recuperado;
- Período de Vida Ótimo;
- Outras técnicas.

Baseado apenas na idade dos veículos, a técnica Valor-Idade foi aplicada em vários estudos, como nos efectuados para o HDM no Quênia, Índia, Caraíbas e Brasil. Este método consiste assim numa relação entre o valor do capital do veículo e a sua idade.

A técnica do Capital Recuperado é mais específica que a anterior, já que permite a determinação directa do custo de desvalorização por quilómetro. À semelhança das técnicas em que a desvalorização é considerada linear (por exemplo o HDM-III), o custo total de desvalorização é definido como a diferença entre o custo de um veículo novo, menos pneus, e o valor residual do veículo. Todavia, a técnica do Capital Recuperado ajusta os valores do veículo novo e residual tendo em conta os efeitos do tempo no capital, convertendo estes custos em custos anuais.

Por último, a técnica do Período de Vida Óptimo tem como princípio base o de que a minimização dos custos seja atingida quando o veículo é abatido no momento correspondente ao seu período de vida óptimo. Ao considerar esta suposição, é possível calcular o período de vida óptimo para diversas condições.

Pelo HDM-4, o período de vida dos veículos pode ser determinado através de dois métodos: o método do período de vida constante e o método do período de vida óptimo. O primeiro considera que o período de vida do veículo é constante independentemente da velocidade do veículo ou das condições de operação dos veículos sendo considerado igual ao valor especificado pelo utente. Quanto ao método do período de vida óptimo, mais interessante no âmbito dos custos de desvalorização, determina esse mesmo período de vida óptimo para diferentes valores de irregularidade da estrada. A figura 2.6 apresenta o efeito da irregularidade na utilização durante o tempo de vida do veículo por este método.

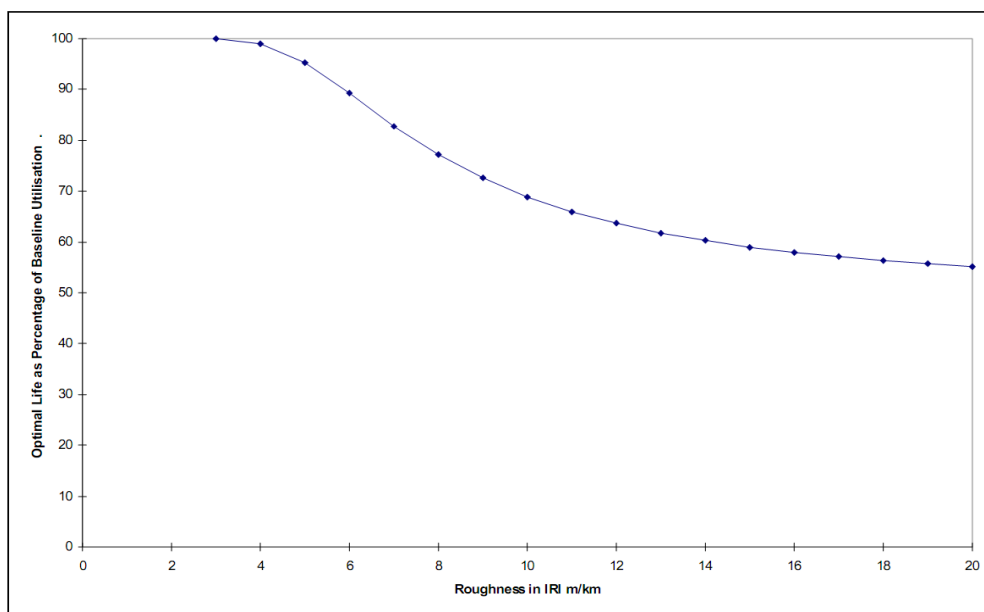


Figura 2.6 - Efeito da irregularidade na utilização durante o tempo de vida pelo método do período de vida óptimo (Bennett e Greenwood, 2003)

Tendo por base a figura exibida acima, apresenta-se ainda uma outra que mostra a relação entre a irregularidade e os custos de desvalorização para o método do período de vida óptimo. Esta relação foi obtida através de dados de custos da Tailândia para nove classes de veículos.

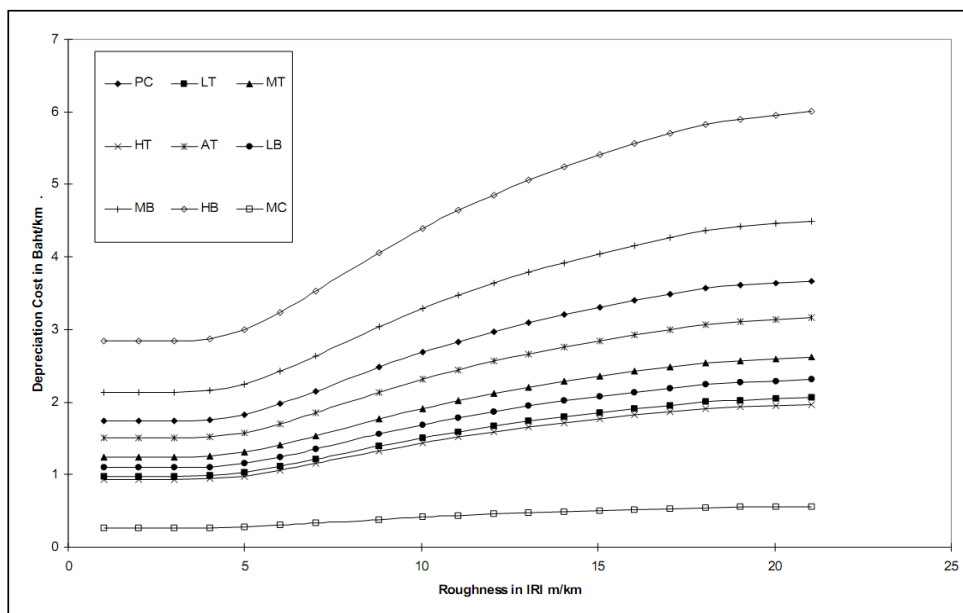


Figura 2.7 - Exemplo do efeito da irregularidade nos Custos da desvalorização na Tailândia (Bennett e Greenwood, 2003)

Onde:

PC - Veículo Ligeiro de Passageiros (Passenger Car);

LT - Veículo Pesado de 2 pequenos eixos (Light Truck);

MT - Veículo Pesado Médio de 2 eixos (Medium Truck);

HT - Veículo Pesado com multi-eixos (Heavy Truck);

AT - Veículo Pesado Articulado (Articulated Truck);

LB - Pequeno Veículo Pesado de Passageiros (aproxim<3.5 toneladas) (Light Bus);

MB - Pequeno Veículo Pesado de Passageiros (3.5 - 8 toneladas) (Medium Bus);

HB - Veículo Pesado de Passageiros com multi-eixos (Heavy Bus).

MC - Motociclos (Motorcycle).

Ao analisar a figura observa-se que a desvalorização dos veículos varia lentamente até um valor de IRI de cerca de 5m/km. A partir daqui a variação é muito mais significativa. Destaque ainda para as classes dos veículos de passageiros (“Heavy Bus” e “Medium Bus”) onde a desvalorização é mais acentuada. Por outro lado, os motociclos são aqueles cuja desvalorização menos varia com a mudança de IRI.

### **Componentes de COV e a irregularidade longitudinal**

Como foi visto na descrição de todas estas componentes dos COV, o estado dos pavimentos, traduzido pela sua irregularidade longitudinal, é um dos factores que mais influencia este tipo

de custos, dando origem a um custo adicional para os utentes. Ao melhorar o estado dos pavimentos diminui-se o consumo e o custo das componentes consideradas nos COV, tendo maior expressão nas componentes dos pneus e da manutenção.

Desta forma, é possível prever que uma diminuição dos COV e dos CUE totais passa por um programa cuidado de manutenção e reabilitação dos pavimentos das redes rodoviárias, garantindo simultaneamente níveis elevados de qualidade de circulação.

Outros factores relacionados com os parâmetros geométricos da estrada, como por exemplo as inclinações longitudinais e os raios de curvatura em planta podem igualmente influenciar de forma significativa este tipo de custos.

Sendo esta parcela dos CUE o objecto de estudo deste trabalho, o principal ênfase do remanescente documento recairá no tema dos COV, em especial nos custos adicionais que se verificam nesta componente dos CUE devido ao estado dos pavimentos das redes rodoviárias.

### **2.2.2. Custos do Tempo de Percurso**

Perceber que o tempo de percurso é função da velocidade de circulação dos veículos é um conceito do senso comum. A velocidade, por sua vez, é função das características geométricas da estrada, das condições de circulação do tráfego, do tipo de veículo e do estado do pavimento.

Os CTP são geralmente expressos em função do salário ou rendimento médio horário nacional ou regional e da finalidade da viagem (viagens em trabalho e não-trabalho). Quando estes custos estão associados a estradas de tráfego intenso podem assumir um peso muito elevado no total dos custos dos utentes, já que os congestionamentos provocam perdas de tempo consideráveis.

Na perspectiva dos custos adicionais, os CTP são afectados principalmente pelos trabalhos de conservação, ou seja, pelos troços em obras. O tempo adicional provocado pelos trabalhos na via acarreta custos adicionais que, em certos casos, podem ser muito elevados determinando a diferença nos custos globais para o utente.

Muitos investimentos em infra-estruturas rodoviárias novas têm sido justificados com base no custo relacionado com a redução do tempo de percurso, o que sustenta a importância da sua consideração na avaliação dos custos totais para os utentes.

### **2.2.3. Custos dos Acidentes**

Esta porção dos custos dos utentes compreende os custos de acidentes pessoais (vítimas mortais, feridos graves e feridos ligeiros) e ainda os custos relacionados com os danos materiais e de assistência ao acidente (danos de propriedade e assistência médica e policial).

Para além da consideração dos custos das vítimas e da assistência ao acidente, alguns estados dos Estados Unidos da América (EUA) incluem ainda um factor de multiplicação que tem por objectivo permitir a consideração dos custos dos acidentes com danos materiais não declarados. Em muitos países, à semelhança de Portugal, a participação de um acidente às autoridades não é obrigatória, à excepção dos casos onde se verificam vítimas mortais ou feridos. Deste modo, uma boa parte dos acidentes apenas com danos materiais não são declarados em Portugal, logo é difícil quantificar este custo na rede rodoviária nacional (Teixeira, 2011).

Os custos dos acidentes são geralmente modelados com recurso à utilização ou definição de taxas de sinistralidade médias em função da localização e tipo de estrada.

#### **2.2.4. Custos de Portagem**

Os Custos de Portagem são aqueles que estão relacionados com a cobrança, ao utente que circula numa via com portagem, de uma taxa por parte do poder público ou de uma concessionária (empresa delegada para ressarcir os custos de construção e manutenção de uma via rodoviária) mediante a passagem de um veículo nessa mesma via. Considera-se assim que a portagem rodoviária representa o preço pago pelo acesso e fruição a uma infraestrutura de transportes.

A cobrança de portagem pode ser efectuada directa ou indirectamente ao utente, ou seja, através da cobrança de uma portagem real ou uma portagem virtual, respectivamente. Na cobrança da portagem real o pagamento é realizado directamente pelos utentes, enquanto que na cobrança da portagem virtual o pagamento é feito pela totalidade dos contribuintes (utilizadores ou não das vias com portagens).

Até finais de 2010, parte da rede de auto-estradas de Portugal praticava uma cobrança real de portagens, praticando as restantes auto-estradas da rede, as designadas SCUT -“ Sem Custos para o Utilizador”, uma cobrança virtual. No entanto, prevê-se a alteração desta situação a partir de Novembro de 2011, uma vez que serão cobradas portagens reais nas SCUT através da implementação de sistemas electrónicos de cobrança, caracterizados pela colocação de identificadores nos veículos e de equipamentos instalados nas vias.

#### **2.2.5. Custo do Desconforto**

Os custos do desconforto constituem a componente dos custos dos utentes com maior grau de dificuldade de determinação, conduzindo ao facto de, na maioria dos casos, não ser considerada. Contudo, é ao avaliar o conforto de circulação que a maioria dos utentes estabelece a sua classificação do estado da estrada (Branco et al, 2008). O custo do desconforto é muitas vezes encarado como resultante do estado dos pavimentos das redes.

### 2.2.6. Breve descrição dos Modelos existentes para determinação dos CUE

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos vários modelos de custos dos utentes da estrada aplicados na gestão rodoviária. Cada um dos modelos é, de certa forma, mais adequado às condições dos países para os quais foram concebidos e onde são aplicados. Muitos destes modelos têm semelhanças na sua estrutura relativamente à usada no modelo do sistema HDM-4 (“Highway Development and Management”) do Banco Mundial (Santos, 2007), sendo este considerado um modelo de referência internacional. Seguidamente apresentam-se uma pequena descrição de alguns dos modelos existentes.

#### *HDM-RUE - “Modeling Road Use and Environmental Effects in HDM-4”*

O Highway Design and Maintenance Standards Model (HDM) começou por ser desenvolvido em 1977. Passados cerca de quatro anos, em 1981, surgiu a segunda versão do modelo (HDM-II) e em 1987 a terceira (HDM-III) (Watanatada et al, 1987).

Entre 1993 e 2000, devido ao facto de se ter verificado a existência de algumas limitações do HDM-III no que concerne aos custos de operação dos veículos e à deterioração dos pavimentos, desenvolveu-se o International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM). Este estudo teve como objectivo actualizar o HDM-III (Highway Design and Maintenance Standards Model) e lançar o HDM-4. Este é constituído por sete volumes, sendo o sétimo aquele que mais importa no âmbito deste trabalho, intitulado-se “Modeling Road Use and Environmental Effects (RUE) (Bennett e Greenwood, 2003).

Os princípios de “Modelação dos Efeitos no Utente da Estrada e no Ambiente”, expostos no volume 7 do HDM-4 do Banco Mundial, apresentam uma abordagem para a modelação dos aspectos básicos relacionados com a determinação dos custos dos utentes da estrada e com o ambiente, incluindo os aspectos apresentados na figura 2.8.

O objectivo do modelo HDM-RUE é o de simular os efeitos das características físicas e das condições da estrada possibilitando assim, determinar os consumos e quantidades das componentes de custo consideradas nos COV, nos CTP e nos CA, com o intuito de determinar os custos dos utentes da estrada totais. Este modelo recorre, conforme a componente considerada, a abordagens empíricas, mecanicistas ou a análises de dados provenientes de inquéritos e estudos. Como permite adaptar-se às condições locais através da possibilidade da calibração do modelo, constitui o modelo existente mais aplicado, testado e validado em todo o mundo.

No âmbito do HDM-RUE existe ainda uma ferramenta de software, o Modelo de Custos dos Utentes da Estrada do HDM-4, que actualmente se encontra na sua Versão 2.00. Esta versão permite, entre outros tipos, uma análise de sensibilidade à irregularidade do pavimento, estudando a variação dos custos dos utentes devido ao estado dos pavimentos, como se irá verificar mais à frente.

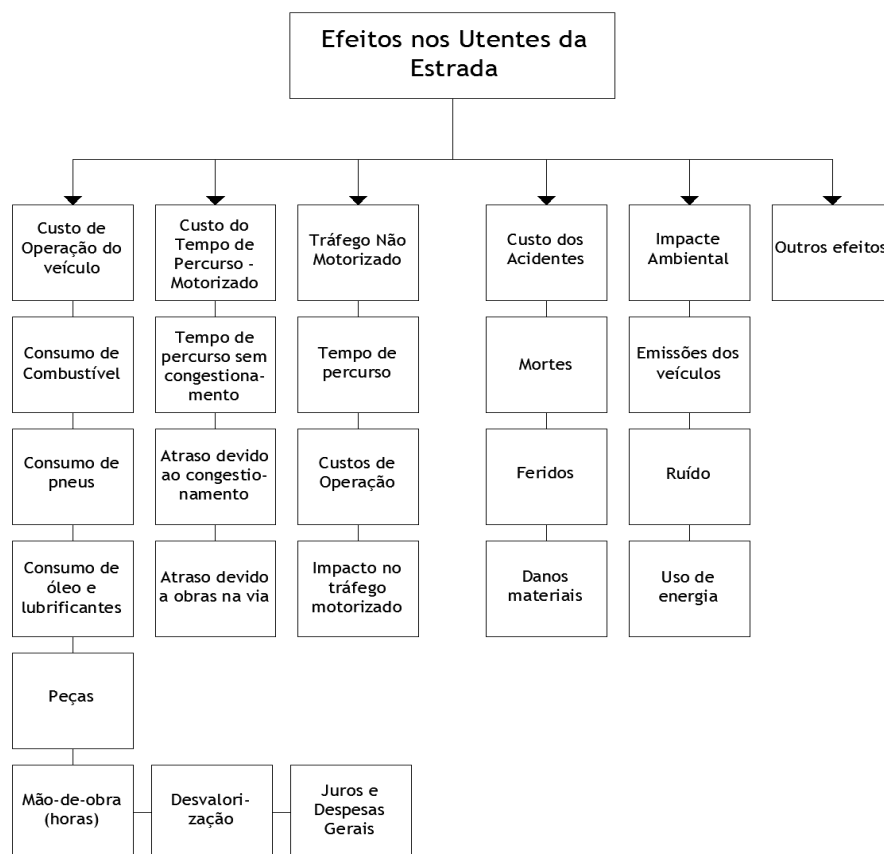


Figura 2.8 - Elementos considerados na definição dos efeitos no utente da estrada do HDM-4 (adaptado de Bennett e Greenwood (2001) e citado em Santos (2007))

### COBA - “Cost Benefit Analysis”

A “Análise Custo Benefício” do COBA consiste num programa de computador desenvolvido pelo “Department for Transport” do Reino Unido e distribuído pelo Transport Research Laboratory (TRL) sendo utilizado na avaliação de cenários rodoviários (COBA, 2006). A versão actual deste programa é o COBA 11 R12 que foi lançado em Junho de 2011.

No Reino Unido os projectos de transportes são avaliados através da consideração de cinco objectivos: Ambiente, Segurança, Economia, Acessibilidade e Integração. O COBA funciona comparando os custos suportados pelo sistema rodoviário com os benefícios que os utentes usufruem em termos de tempo, custos de operação dos veículos e acidentes, expressando os resultados em termos de uma estimativa monetária. A saída de dados do programa contribui para a avaliação de projectos rodoviários com informação respeitante aos seguintes parâmetros:

- Economia - variação do tempo de percurso e do custo de operação do veículo;
- Segurança - variação dos custos dos acidentes e do número de vítimas;
- Ambiente - variação da quantidade de combustível consumido para uma melhor percepção dos impactes ambientais associados.

O esquema da figura 2.9 apresenta o processo de cálculo das variações dos custos dos utentes para um determinado cenário da rede rodoviária. A figura 2.10 ilustra o modo como as variações dos custos de construção de um determinado cenário e dos custos do utente são considerados em conjunto no processo de avaliação.

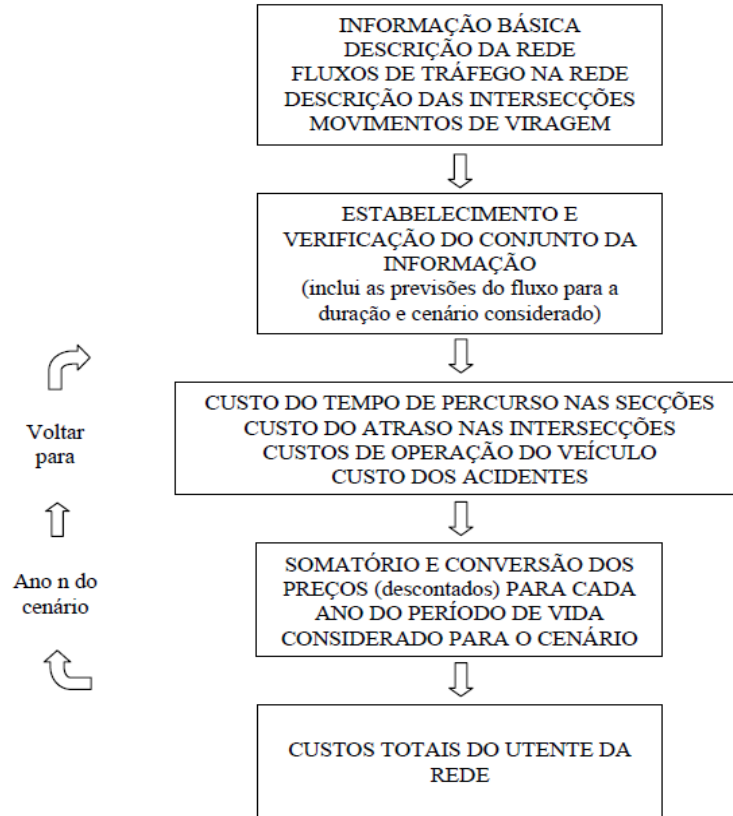


Figura 2.9 - Processo de cálculo dos custos do utente do Modelo COBA (adaptado de COBA (2006) e citado em Santos (2007))

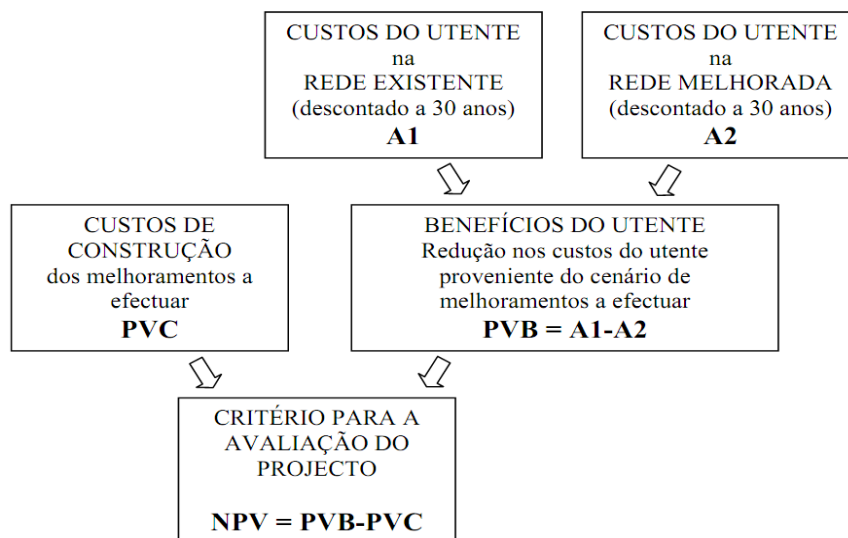


Figura 2.10 - Processo de avaliação do programa COBA (adaptado de COBA (2006) e citado em Santos (2007)):

Na figura 2.10:

PVC é o valor actualizado do conjunto dos custos (“Present Value of stream of Costs”)

PVB é o valor actualizado de um conjunto de benefícios (“Present Value of a stream of Benefits”)

NPV é o valor actualizado líquido (“Net Present Value”)

O modelo COBA não considera directamente o factor do estado dos pavimentos na sua modelação. Contudo, o estado dos pavimentos é considerado indirectamente uma vez que o COBA compara os custos do utente numa rede existente com esses mesmos custos na rede melhorada (figura 2.10), ou seja, uma melhoria do estado do pavimento é considerada, já que resulta das acções de beneficiação da rede.

### ***NZVOC - “New Zealand Vehicle Operating Cost Model”***

O “Modelo Neo-Zelandês de Custos de Operação de Veículos” (Transfund, 2003) foi desenvolvido na década de 80 do século passado com o objectivo de prever os COV a empregar nas avaliações económicas de infra-estruturas rodoviárias neozelandesas. Trata-se de uma aplicação do modelo de COV do HDM-4 (com valores recomendados por defeito), calibrado com informação local de modo a traduzir a realidade neozelandesa, obtendo-se desta forma uma versão melhorada da modelação em relação à realizada com o HDM-4.

As componentes dos COV determinadas no modelo são os custos do combustível, do óleo, da reposição do veículo, dos pneus e do trabalho de manutenção. É usado pela agência governamental “Transfund New Zealand” para criar quadros de estimativas de custos de operação de veículos a considerar no “Project Evaluation Manual” (PEM). Um dos tipos de quadros que podem ser criados pelo NZVOC é os do tipo “COV versus Irregularidade” que se caracterizam por produzir informação de COV versus irregularidade considerando várias velocidades.

A produção de quadros semelhantes pode ser efectuada para outras realidades, fazendo, à semelhança do NZVOC, uma calibração do modelo HDM-4 de forma a traduzir determinado cenário. Um processo simplificado semelhante é apresentado no ponto 4 para o cenário português.

### ***MC JAE - Modelo de Custos do Utente da Junta Autónoma de Estradas***

O Modelo de Custos dos Utentes da JAE (GEPA, 1995) foi desenvolvido na década de 90 do século passado para a rede rodoviária portuguesa. No entanto, este modelo nunca chegou a ser implementado. O modelo interliga uma Base de Dados da Conservação, através da qual são recebidas as informações necessárias ao modelo de custos, como por exemplo o estado do pavimento e a caracterização de tráfego, para posterior determinação dos custos e programação das acções de conservação. O modelo de custos, consiste assim, num conjunto de relações simples entre o estado dos pavimentos, expresso pela irregularidade longitudinal,

e as parcelas de CUE consideradas (COV, CTP e custos de desconforto), desenvolvidas com base no Sistema de Gestão de Pavimentos da Noruega (Pereira e Miranda, 1999).

O cálculo dos custos é realizado a partir da consideração da categoria do itinerário rodoviário (importância e geometria da estrada) e ainda das características do tráfego (veículos e utentes respectivos). A figura 2.11 representa a estrutura geral do modelo de custos onde se definem diferentes módulos e as respectivas relações funcionais.

O Modelo de Custos da JAE apresenta ainda uma “biblioteca de custos unitários de referência” relativos a uma “irregularidade de referência”, que representa a qualidade desejável do pavimento. Esta irregularidade de referência é dada por um IRI de 2,7m/km, correspondendo a um coeficiente de 100%, ou seja, o custo de referência é igual ao calculado.

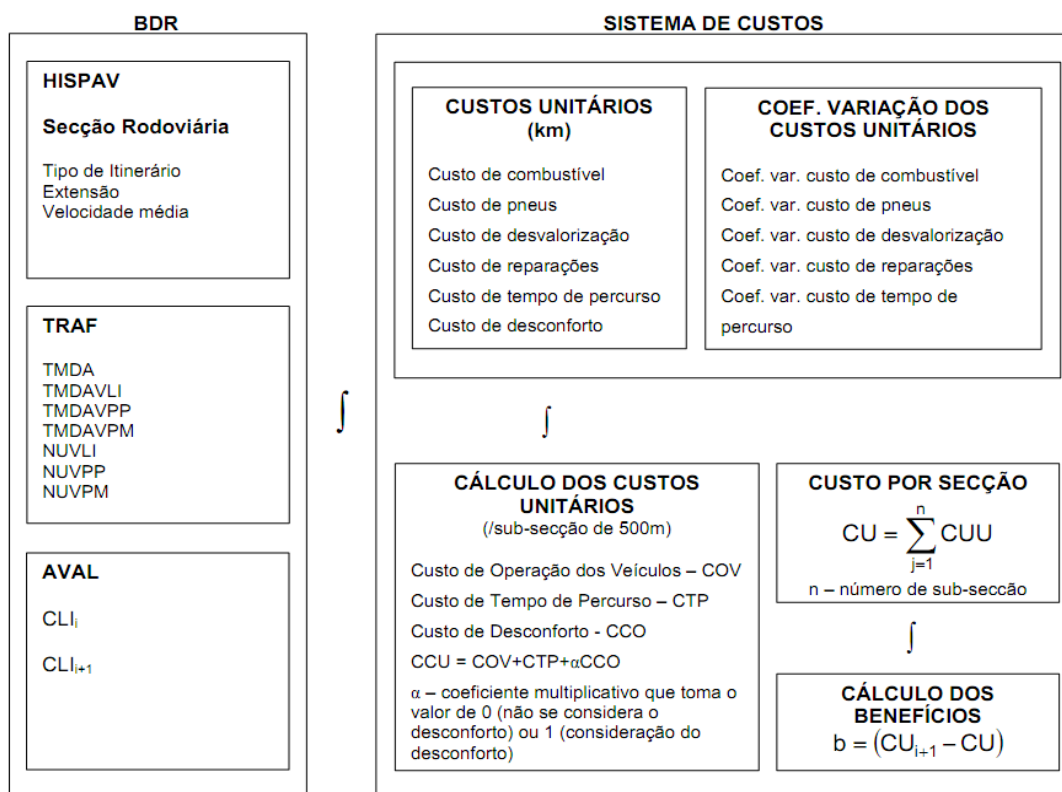


Figura 2.11 - Estrutura do sistema de custos (adaptado de Pereira e Miranda (1999) e citado em Santos (2007))

Quando a irregularidade se caracteriza por outros valores do IRI é necessário determinar a variação desses custos de referência em função da variação do valor da irregularidade longitudinal, de modo a determinar o correspondente custo. Na figura 2.12 é apresentado um exemplo da variação dos custos unitários para a componente da desvalorização dos COV. É possível verificar que com o aumento do IRI atingem-se percentagens elevadas, significando que os valores de referência seriam afectados consideravelmente.

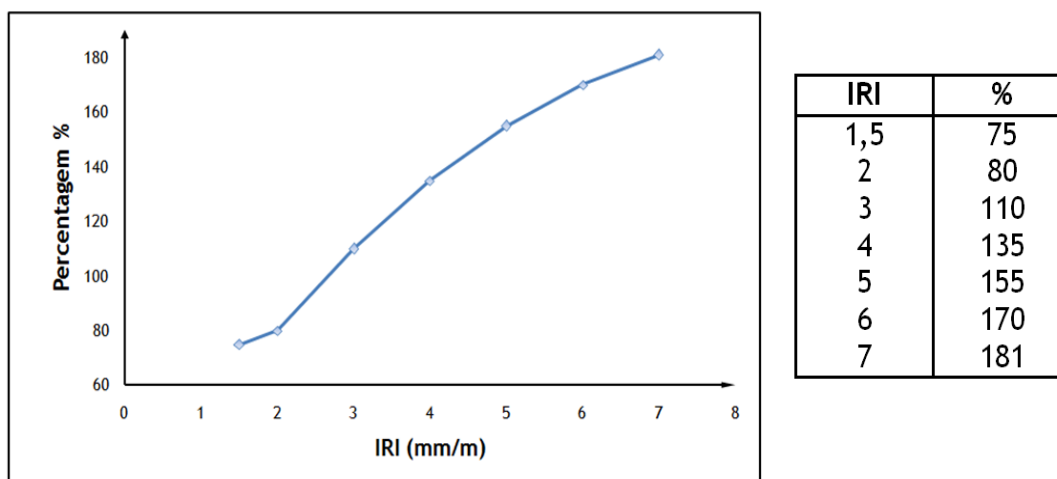


Figura 2.12 - Coeficiente de variação dos custos de desvalorização (adaptado de Pereira e Miranda, 1999)

### **Modelo Português de Custos dos Utentes das Estradas**

É o modelo mais recente desenvolvido para a rede rodoviária portuguesa tendo sido proposto por Bertha Santos no âmbito da sua tese de doutoramento, no ano de 2007. O modelo foi desenvolvido e definido com o objectivo de obter um modelo de fácil compreensão, utilização e calibração (Santos, 2007). Tem por base a utilização de modelos (como os acima descritos) ou parte de modelos existentes, em certos casos simplificados, de forma a efectivar a sua aplicação tendo em conta a informação normalmente disponível. O modelo propõe uma metodologia para determinar os CUE para o caso português tendo por base o campo de acção da rede rodoviária nacional. Com o intuito de adequar o modelo a Portugal, este foi desenvolvido com base nos seguintes princípios (Santos, 2007):

- Consideração dos princípios conceptuais estabelecidos;
- Aplicação à rede rodoviária nacional (principal);
- Impacto das componentes consideradas no total dos custos do utente;
- Particularidades da realidade portuguesa;
- Informação disponível.

O modelo considera três componentes de custos: os custos de operação de veículos, os custos dos acidentes e os custos de tempo de percurso. Pode incluir ainda outra componente, sempre que seja relevante, relativa à cobrança de portagens. A informação necessária à aplicação do modelo é também um aspecto importante, já que os dados a utilizar no modelo estão normalmente disponíveis através de entidades oficiais portuguesas, organizações de classe ou associações e empresas transportadoras nacionais com gestão de frotas.

Na sequência da sua realização, o modelo foi também testado, utilizando a informação de duas redes rodoviárias portuguesas concessionadas, a Scutvias (com cobrança de portagem virtual) e a Aenor (com cobrança de portagem real), tendo sido obtidos resultados satisfatórios.

As aplicações práticas do modelo permitiram também verificar a importância dos COV no total dos CUE, já que a parcela dos COV apresentou uma contribuição com percentagens superiores a 50% dos CUE totais. Assim, e no seguimento deste modelo, um dos objectivos do presente trabalho é o de pretender dar um contributo para a validação de um refinamento proposto para o modelo no que diz respeito à consideração da variação do efeito do estado dos pavimentos neste tipo de custos (COV).



### 3. Efeitos do estado dos pavimentos rodoviários nos custos de operação dos veículos

#### 3.1. Introdução

Das três parcelas normalmente consideradas nas metodologias existentes (COV, CTP e CA) para o cálculo dos CUE, a dos custos de operação dos veículos é a que tem merecido maior reflexão por parte dos investigadores e aquela que se encontra melhor estudada, pois representa a parcela mais significativa no total dos CUE, sendo este facto comprovado nos estudos desenvolvidos.

De entre os estudos que dão conta da significativa contribuição dos COV no total dos CUE encontram-se por exemplo: o HDM-4, o NZVOC, o COBA, o modelo de custos da JAE e ainda o modelo português de CUE.

No âmbito do desenvolvimento do modelo português de CUE, foram efectuados vários estudos comparativos entre os valores obtidos para as componentes de custos consideradas neste modelo e os obtidos através da aplicação de modelos de referência em uso, como os mencionados anteriormente (Santos et al, 2009b). Os resultados obtidos da avaliação da contribuição dos COV e CPT no total dos CUE são apresentados nas figuras 3.1 e 3.2.

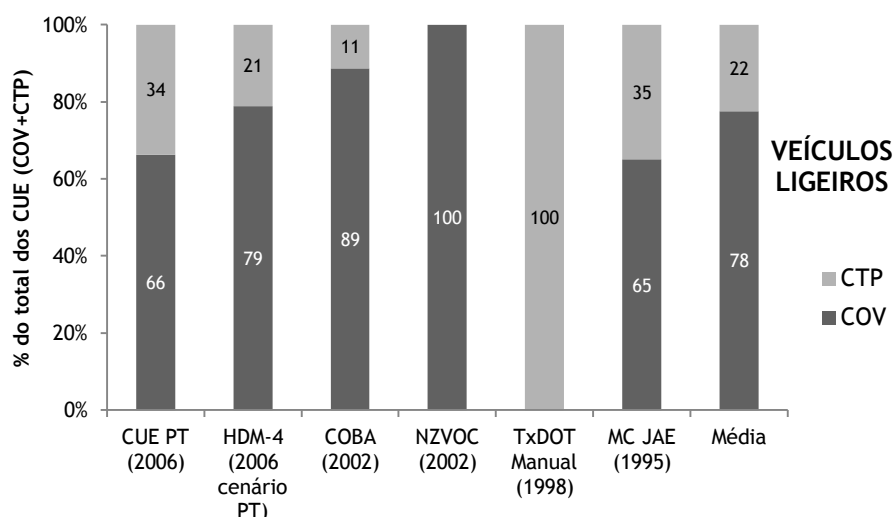


Figura 3.1 - Distribuição dos COV e CTP nos CUE, para os veículos ligeiros (Santos et al, 2009b)

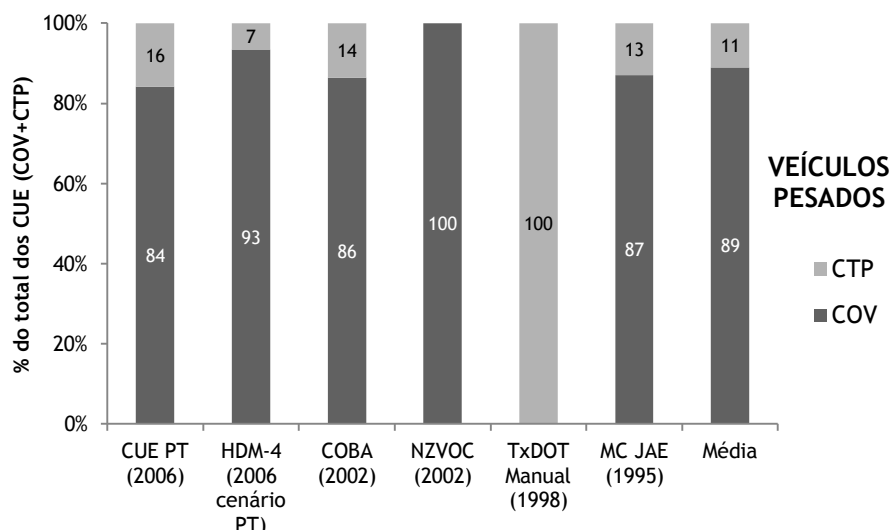


Figura 3.2 - Distribuição dos COV e CTP nos CUE, para os veículos pesados de mercadorias (VPM) (Santos et al, 2009b)

Pela observação dos gráficos das figuras, é perceptível a elevada contribuição dos COV no total dos CUE, traduzidas por percentagens superiores a 65%, com uma média de 78% para os veículos ligeiros de passageiros e 89% para os pesados de mercadorias. Como pode ser observado, tendo em conta as análises efectuadas para as duas classes principais de veículos representativos, esta contribuição é ainda mais importante para o caso dos veículos pesados de mercadorias, que em Portugal representam em média cerca de 10% do tráfego total de veículos.

É de notar ainda que a proximidade obtida entre os valores do modelo proposto e o HDM-4 reflecte o facto de o modelo português se ter baseado essencialmente numa simplificação deste, especialmente para a definição das equações dos COV.

Tendo em conta o descrito, o estado ou a qualidade dos pavimentos constitui um factor importante a ter em conta na definição deste custo, já que pode influenciar os custos de operação dos veículos, em especial os relacionados com a manutenção, reparação e desvalorização dos veículos, resultando num custo adicional para os utentes.

Este trabalho procura contribuir para a validação de uma formulação simplificada a incluir no modelo de CUE português, cujo objectivo é avaliar a influência do estado dos pavimentos nos COV, através da determinação de um coeficiente de agravamento ou redução do custo, função de um índice que represente a qualidade dos pavimentos.

É possível encontrar na bibliografia disponível várias abordagens que demonstram a influência do estado dos pavimentos nos COV, entre elas é possível salientar as seguintes:

- O estudo efectuado pelas Universidades de Coimbra e do Minho a respeito da rede rodoviária nacional, em 2006 (Picado Santos et al, 2006);

- O HDM-4 Road Use Cost Model de 2010 Versão 2.0 (World Bank, 2010);
- O estudo das Universidades de São Paulo (Brasil) e de Tohoku (Japão) sobre o sistema de gestão de pavimentos para a cidade japonesa de Sendai, em 1998 (Shoji et al, 1998);
- O estudo das universidades de Walailak (Tailândia) e North Dakota State (Estados Unidos da América) sobre o desenvolvimento de modelos de estimação de benefícios para a aplicação nos pavimentos da rede rodoviária tailandesa, em 2007 (Wipulanusat e Herabat, 2007).
- Os estudos elaborados pela ASTM (“American Society for Testing and Materials”) relacionados com a variação das componentes de “não-combustível” com o estado dos pavimentos (ASTM, 1983);
- O estudo da variação da componente de combustível com o estado dos pavimentos do TRB (“Transportation Research Board”), que completa o estudo de 1983 da ASTM (Zaniewski, 1983);
- O estudo publicado pela organização internacional OCDE EM 2001 (OCDE, 2001);
- O modelo de custos dos utentes da JAE de 1995, que apresenta a variação das diferentes componentes de custos em função da irregularidade dos pavimentos (GEPA, 1995).

Todas estas abordagens avaliam este parâmetro relacionando os custos de operação com índices representativos da qualidade do pavimento, como o PSI (“Present Serviceability Index”), ou com características específicas da estrada que podem ser utilizadas para aferir essa mesma qualidade (já que têm um peso significativo em formulações para obter um índice global de qualidade do pavimento), como é o caso do IRI (“International Roughness Index”). Estes dois conceitos serão abordados mais adiante nos pontos 3.2.5 e 3.2.3, respectivamente.

Como se pode visualizar no quadro 3.1, nem todas as componentes dos COV têm um impacto significativo nos custos totais e nas respectivas parcelas de custo. Devido a este aspecto, só algumas têm sido alvo de uma investigação pormenorizada, focando-se esta principalmente nas componentes mais críticas. O mesmo quadro permite considerar em simultâneo a contribuição de cada componente dos COV nos CUE e a sensibilidade à condição do pavimento de cada componente.

Neste quadro, a parcela relativa aos custos dos pneus é a mais afectada pelo estado do pavimento, no entanto, esta parcela tem, simultaneamente, um impacto pouco significativo nos COV e por consequência nos custos globais (CUE). Deste modo, apesar de ser extremamente afectada pela condição do pavimento, o custo total obtido para os COV e CUE não vai sofrer uma variação significativa. Assim, em termos gerais, as componentes do combustível, da manutenção e da desvalorização são as que apresentam um impacto alto (combustível) e médio (manutenção e desvalorização) nos CUE e médio na sensibilidade à condição do pavimento, constituindo o conjunto de componentes com variações de custo mais significativas quando se verificam diferentes estados do pavimento.

Neste capítulo, pretende-se assim analisar dois aspectos essenciais: o primeiro relacionado com a avaliação do estado dos pavimentos, através da descrição das diversas patologias e metodologias de avaliação da qualidade dos pavimentos, do IRI e do PSI; e no segundo, descrever a formulação e a informação necessária para aplicação modelo português de CUE (Santos, 2007) para obtenção dos custos de operação dos veículos.

## **3.2. Avaliação do estado dos pavimentos rodoviários**

### **3.2.1. Enquadramento**

Sabendo que o estado ou qualidade dos pavimentos é um dos factores com maior importância nos custos dos utentes, não só nos COV mas também nos CTP, torna-se essencial considerar este parâmetro como factor de variação destes custos para no fim, obter uma abordagem económica mais precisa e rigorosa. O objectivo é então que as metodologias desenvolvidas incorporem este factor de modo a obter o respectivo reflexo nos custos dos utentes.

O desempenho dos pavimentos, entendido como a capacidade de suportar as cargas do tráfego e como a capacidade de oferecer uma superfície de circulação confortável e segura deve ser, tanto quanto possível, o mais elevado de modo a proporcionar aos utentes um adequado grau de satisfação. Quando esta situação não acontece há a necessidade de uma intervenção de manutenção ou reabilitação que, preferencialmente, não deverá ser de fundo, ou seja, não é aconselhável que o pavimento atinja um elevado nível de degradação, já que neste caso as intervenções necessárias para a sua reabilitação tornam-se muito dispendiosas.

No entanto, para se partir para uma intervenção num pavimento é necessário obter uma avaliação apropriada da qualidade do mesmo. Esta avaliação pode passar pela análise da existência de determinadas patologias nos pavimentos, pela determinação de índices que avaliem o seu estado global, como é o caso do PSI, e também pela análise de características específicas da estrada como a irregularidade, medida através da quantificação do índice IRI.

### **3.2.2. Patologias dos pavimentos rodoviários**

Um pavimento rodoviário de boa qualidade é aquele que permite uma circulação segura, cómoda, económica, e de fraca sonoridade. Para isso, o pavimento tem de apresentar capacidade de resistência a deformações e desgastes apreciáveis, quando se geram solicitações provenientes dos rodados dos veículos, assim como capacidade de defesa aos agentes atmosféricos. No entanto, após a sua construção e entrada em serviço, o estado dos pavimentos vai-se deteriorando, quer por acção do tráfego, quer por acção dos agentes atmosféricos não conseguindo manter as características predefinidas e de qualidade iniciais (Antunes, 2005).

Quadro 3.1 - Matriz do impacto das componentes do custo do utente da estrada (adaptado de Anderson et al, 1992 e citado em Bennett e Greenwood, 2003)

Componentes dos Efeitos no Utente da Estrada												
Impacto do Custo	Custos de Operação do Veículo				Custos do Atraso			Custos dos Acidentes				
	Combustível	Óleo	Pneus	Manutenção e Reparação	Desvalorização e Juros	Atraso nas Zonas de Trabalhos	Atraso devido ao Congestionamento	Atraso nas Intersecções	Custos Directos	Custos Indirectos	Custo que incorre devido ao adiamento da Manutenção	
Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	
Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	
Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	
Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	
Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	
Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	
Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	Importante	
Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória	
Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	
	Impacto nos Custos do Utente				Sensibilidade ao Tipo de Pavimento (1)			Sensibilidade à Condição do Pavimento (2)			Grau de Pesquisa (3)	

- (1) A sensibilidade do custo do utente ao tipo de pavimento considera pavimentos rígidos de cimento portland e pavimentos flexíveis betuminosos;
- (2) Condição do pavimento em termos de PSI - Present Serviceability Index;
- (3) Quantidade de pesquisa realizada até à data do documento consultado e referente à componente do custo do utente considerada e não ao tema em geral

A degradação de um pavimento pode ser de tipo estrutural e/ou funcional (Yoder e Witczak, 1975). A degradação estrutural está relacionada com o colapso da estrutura do pavimento ou com a fadiga de um ou mais componentes, de tal ordem que o pavimento é incapaz de suportar as cargas impostas. A degradação funcional ocorre quando o pavimento perde a capacidade de proporcionar uma circulação suficientemente segura e cómoda, ou seja, está associada à degradação das características superficiais, mais especificamente, da camada de desgaste.

De acordo com Pereira e Miranda (Pereira e Miranda, 1999), o processo de evolução das degradações de um pavimento apoia-se no “princípio da cadeia das consequências”, em que uma degradação não evolui isoladamente no tempo, antes dá origem a outras degradações que interferem com as características das primeiras. Assim, inicia-se uma actividade em ciclo, onde as diferentes degradações interferem mutuamente. Com este processo, as degradações atingem tal estado de evolução que, a determinada altura da vida de um pavimento, é exigível a aplicação de acções de conservação apropriadas.

Segundo os mesmos autores, o processo de degradação de um pavimento dependente de dois grupos de factores: os factores passivos, que são os característicos do pavimento construído (espessura das camadas, materiais utilizados, qualidade de construção); e os factores activos, que são os principais responsáveis pela degradação e que compreendem as acções do tráfego e do clima. Tendo em conta todos estes factores que causam a degradação dos pavimentos, a tarefa de manter um bom desempenho dos mesmos no tempo de vida útil torna-se um desafio constante, sendo necessário definir procedimentos capazes de assegurar uma conveniente gestão dos pavimentos.

O conteúdo de todo este documento tem como âmbito os pavimentos flexíveis, deste modo, as patologias descritas neste ponto estão relacionadas com este tipo de pavimentos.

Existem vários tipos e diferentes grupos (ou famílias) de patologias dos pavimentos flexíveis. Em Pereira e Miranda (Pereira e Miranda, 1999) são organizados e divididos os diversos tipos de degradações a que estão sujeitos os pavimentos flexíveis, sendo agrupados em quatro famílias de degradação:

- Deformações - alterações de nível do pavimento formando depressões ou alteamentos. Podem ser divididas em quatro tipos: abatimento, deformações localizadas, ondulação e rodeiras.
- Fendilhamento - é a família de degradações mais frequente nos pavimentos flexíveis. É uma degradação que ocorre apenas nas camadas betuminosas devido ao facto destas camadas serem as únicas que possuem resistência à tracção, resultante da coesão que exibem. Esta patologia constitui em geral um dos primeiros sinais aparentes da redução da qualidade estrutural de um pavimento (Branco et al, 2008). Dentro do fendilhamento existem dois tipos de degradações: as fendas e a pele de crocodilo.

- Desagregação da camada de desgaste - traduz-se na perda de qualidade superficial da camada de desgaste devido à evolução da própria camada, resultante da falta de estabilidade da ligação entre os materiais constituintes da mistura. Esta família é composta por quatro tipos de degradações: desagregação da camada superficial, cabeça de gato, peladas e ninhos.
- Movimentação de materiais - resulta da movimentação de materiais constituintes das camadas betuminosas, granulares ou da fundação, através das camadas do pavimento. Os tipos de movimento de materiais associados a pavimentos flexíveis são a exsudação e a subida de finos.

O quadro 3.2 apresenta, em síntese, as famílias de degradações e seus tipos, fazendo uma pequena descrição e apontando as causas possíveis que originam cada uma das degradações.

Quadro 3.2 - Famílias e tipos de degradações (1/2)

FAMÍLIAS DE DEGRADAÇÕES	TIPOS DE DEGRADAÇÕES	DESCRIÇÃO	CAUSAS
DEFORMAÇÕES	<u>Abatimento</u>	Deformação com uma extensão significativa. Pode surgir longitudinalmente (berma ou eixo da faixa de rodagem) ou transversalmente.	Redução da capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, fendilhamento ao longo do eixo.
	<u>Deformações Localizadas</u>	Alterações de nível do pavimento, formando depressões de forma arredondada, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento.	Deficiente capacidade de zonas pontuais do pavimento ou do solo de fundação, falta de capacidade do solo de fundação.
	<u>Ondulação</u>	Deformação transversal que se repete com uma determinada frequência ao longo do pavimento.	Deficiências na distribuição do ligante, arrastamento da mistura de betão betuminoso por excessiva deformação plástica ou deformação da fundação.
	<u>Rodeiras</u>	Deformações longitudinais localizando-se ao longo da zona de passagem dos rodados dos veículos. Podem ser de grande raio ou pequeno raio.	Capacidade deficiente das camadas granulares e da fundação, misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica, insuficiente compactação das camadas em geral.
FENDILHAMENTO	<u>Fendas</u>	Aberturas estreitas no pavimento. As fendas podem dividir-se em: fendas de fadiga, longitudinais, transversais e parabólicas.	Fadiga da estrutura do pavimento, em particular das misturas betuminosas, tensões provocadas pela acção térmica, falta de capacidade de carga da estrutura do pavimento e do solo de fundação.
	<u>Pele de Crocodilo</u>	Fendas que formam entre si uma malha de dimensão variável, localizada inicialmente na zona de passagem dos rodados dos veículos abrangendo progressivamente toda a largura da via de tráfego. Pode ser de malha fina ( $\leq 40$ cm) ou malha grossa ( $> 40$ cm).	Evolução das fendas ramificadas, fadiga das camadas betuminosas, incapacidade de suporte das camadas granulares e fundação.

Quadro 3.2 - (Continuação) Famílias e tipos de degradações (2/2)

FAMÍLIAS DE DEGRADAÇÕES	TIPOS DE DEGRADAÇÕES	DESCRIÇÃO	CAUSAS
DESAGREGAÇÃO DA CAMADA DE DESGASTE	<u>Desagregação da Camada Superficial</u>	Desprendimento de uma fracção do agregado, geralmente a mais grossa.	Evolução de degradações anteriores.
	<u>Cabeça de gato</u>	Perda da componente mais fina da mistura betuminosa na superfície da camada de desgaste, ficando os agregados grossos mais salientes.	Má formulação das misturas betuminosas.
	<u>Pelada (descamação)</u>	Desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste desligadas da camada subjacente.	Espessura reduzida da camada de desgaste ou deficiente ligação entre esta e a camada betuminosa seguinte, elevados esforços tangenciais na zona afectada.
	<u>Ninhos (Covas)</u>	Desagregação dos bordos das fendas que originam a formação de cavidades arredondadas localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores.	Evolução das degradações provocadas pelo fendilhamento, nomeadamente a pele de crocodilo, deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste.
MOVIMENTO DE MATERIAIS	<u>Exsudação</u>	Migração à superfície do ligante betuminoso na camada de desgaste, em particular na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo-lhe um aspecto negro e brilhante;	Camada de desgaste com elevado teor em ligante, ligante de reduzida viscosidade, mistura betuminosa de reduzida estabilidade submetida a tráfego intenso e temperaturas elevadas.
	<u>Subida de finos</u>	Aparecimento de manchas de cor esbranquiçado, devidas à presença de finos, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação. Situam-se inicialmente junto as fendas evoluindo para toda a superfície da camada de desgaste.	Drenagem deficiente do pavimento e circulação da água infiltrada nas camadas granulares através das fendas e expulsa devido à passagem dos veículos.

Além dos grupos já enunciados, o “Catálogo de degradações de pavimentos rodoviários flexíveis” da administração rodoviária portuguesa (JAE, 1997), considera também as reparações observáveis na camada de desgaste como patologias, já que estas correspondem a zonas do pavimento que apresentam uma evolução anormal, sendo susceptíveis ao surgimento de novas patologias.

Ao observar sistematicamente os pavimentos em serviço e analisar o comportamento de trechos experimentais, foi possível obter relações “causa-efeito” e com isso, construir uma matriz de acordo com a organização do quadro 3.3 (Branco et al, 2008). Neste quadro é estabelecida uma ponderação da relação entre os diferentes tipos de degradações (“efeitos”) e os factores de degradação (“causas”), mediante um determinado número de asteriscos (\*).

Quadro 3.3 - Classificação das relações entre as degradações e os factores de degradação (Branco et al, 2008)

DEGRADAÇÕES	FACTORES DE DEGRADAÇÃO									
	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas inferiores	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de fabrico e execução	Ligação entre camada de base e de desgaste	Agressividade do tráfego	Acções climáticas	Camadas estruturais de reduzida compactade
Deformações	***	*	**	***	*	**		*	*	***
Rodeiras	***	*	**	***	**	*		**	**	***
Fendas	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Fendas parabólicas	*	**			**	**	***	***	***	**
Pele de crocodilo	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Pelada		***	*		**	**	***	***	**	**
Ninhos		**	*		***	***	**	**	**	***
Cabeça de gato					***	**		***	*	**
Desagregação superficial					***	***		**	***	**
Exsudação					***	**		***	***	

\*\*\* - Muito importante; \*\* - Importante; \* - Pouco importante

Todas as patologias neste ponto referidas poderão ser mais detalhadamente analisadas, incluindo fotografias exemplificativas, no catálogo de degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis da JAE (actual Estradas de Portugal (EP), S.A) (JAE, 1997).

### 3.2.3. International Roughness Index

Ao executar um trabalho rodoviário existe sempre um desvio entre o perfil longitudinal realizado e o perfil longitudinal projectado (perfil teórico) (Branco et al, 2008). Este desvio é designado de irregularidade longitudinal da superfície do pavimento. A irregularidade longitudinal é assim a variação altimétrica da superfície de um pavimento, em relação a um perfil ideal. É geralmente aleatória, ou seja, a curva de desvio, representada por uma função  $y(x)$  entre o perfil verdadeiro e o perfil de referência, apresenta características de superfície aleatórias como se exemplifica na figura 3.3.

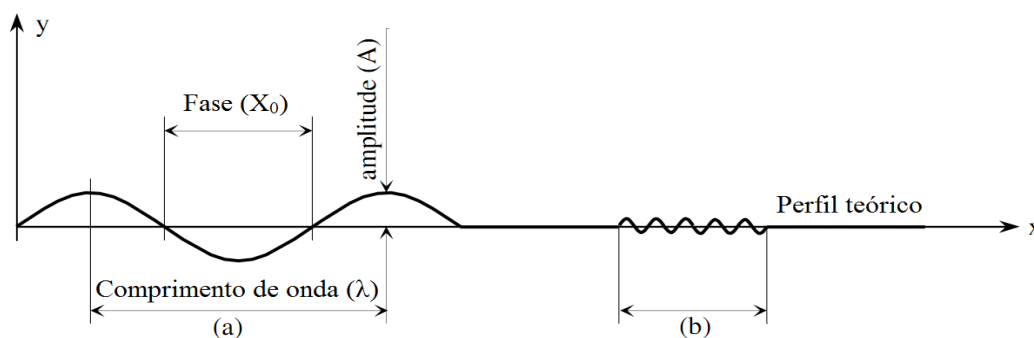


Figura 3.3 - Caracterização da irregularidade longitudinal: (a) grandes comprimentos de onda; (b) pequenos comprimentos de onda (adaptado de Delanne, 1997)

Dado que compreende duas dimensões, a análise da irregularidade é um pouco complexa. Assim, não se pode falar da irregularidade de um determinado ponto, antes é necessário considerar um determinado comprimento de avaliação (Delanne, 1997).

A caracterização da irregularidade longitudinal pode ser realizada através da análise das sinusóides expostas no gráfico da figura 3.3, as quais se caracterizam através de uma função  $y(x)$ , de acordo com a equação 3.1:

$$Y = A \times \text{sen} \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \times (X - X_0) \right] \quad (3.1)$$

Onde:

Y - Desnívelamento;

A - Amplitude da irregularidade;

$\lambda$  - Comprimento de onda;

X - Distância na horizontal;

$X_0$  - Fase.

A irregularidade longitudinal é um factor determinante nas condições de circulação dos veículos, afectando directamente o conforto e a segurança da circulação, podendo ter importantes consequências económicas. Assim, ao longo de um itinerário podem ser encontrados diferentes defeitos de irregularidade para os quais, além dos parâmetros anteriores referidos, ainda deve ser definido a correspondente frequência de ocorrência. Os defeitos do tipo (a) são classificados de irregularidade de elevado comprimento de onda e de reduzida frequência, provocando desconforto nos utentes. Os defeitos do tipo (b) são os que ocorrem em reduzida extensão e, conseqüentemente, com elevada frequência sendo responsáveis pelas oscilações e vibrações dos veículos que, além de provocarem desconforto, aumentam as cargas dinâmicas dos veículos pesados.

Quando se analisa a irregularidade longitudinal, é necessário distinguir esta da eventual heterogeneidade do perfil longitudinal, a qual, sendo uma deficiência de concepção, não é um defeito a considerar na avaliação da qualidade do pavimento num determinado instante. Essa distinção é realizada através da definição dos comprimentos de onda correspondentes aos tipos de defeitos observados. Assim, na gama de comprimento de onda de 0,7 a 50,0 metros incluem-se todos os defeitos classificáveis como irregularidade longitudinal. A partir de 50 metros considera-se que se trata de uma deficiência de concepção do perfil longitudinal (Branco et al, 2008).

A irregularidade longitudinal é um dos factores que afecta mais fortemente a opinião dos utentes sobre a qualidade do pavimento (qualidade funcional). Deste modo, qualquer que seja o equipamento utilizado para avaliar a irregularidade, os valores das diferentes classes a considerar no processo de classificação devem ser calibradas com a informação obtida pelo utente sobre a qualidade de circulação (Menezes, 2008).

O “International Roughness Index” (IRI, Índice de Irregularidade Internacional) foi definido pela primeira vez no final dos anos 70 nos Estados Unidos. Mais tarde foi simplificado e normalizado (ASTM E 1364) pelo Banco Mundial. O IRI é assim um índice de medição da irregularidade longitudinal expresso em mm/m (milímetros por metro) ou m/km (metros por quilómetro), podendo ser descrito como uma avaliação da irregularidade que afecta todos os condutores que circulam num dado troço de estrada. Esta avaliação pode ainda ser descrita como um modelo de efeito, ou seja, um baixo valor de IRI traduz-se em pouco efeito sobre os utentes das estradas e vice-versa (Ihs e Sjögren, 2003).

Este índice permite relacionar as características de irregularidade de um pavimento com os custos de manutenção da via, as condições de segurança e de conforto (ACPA, 2002).

O IRI foi desenvolvido tendo em conta o modelo matemático representado na figura 3.4.

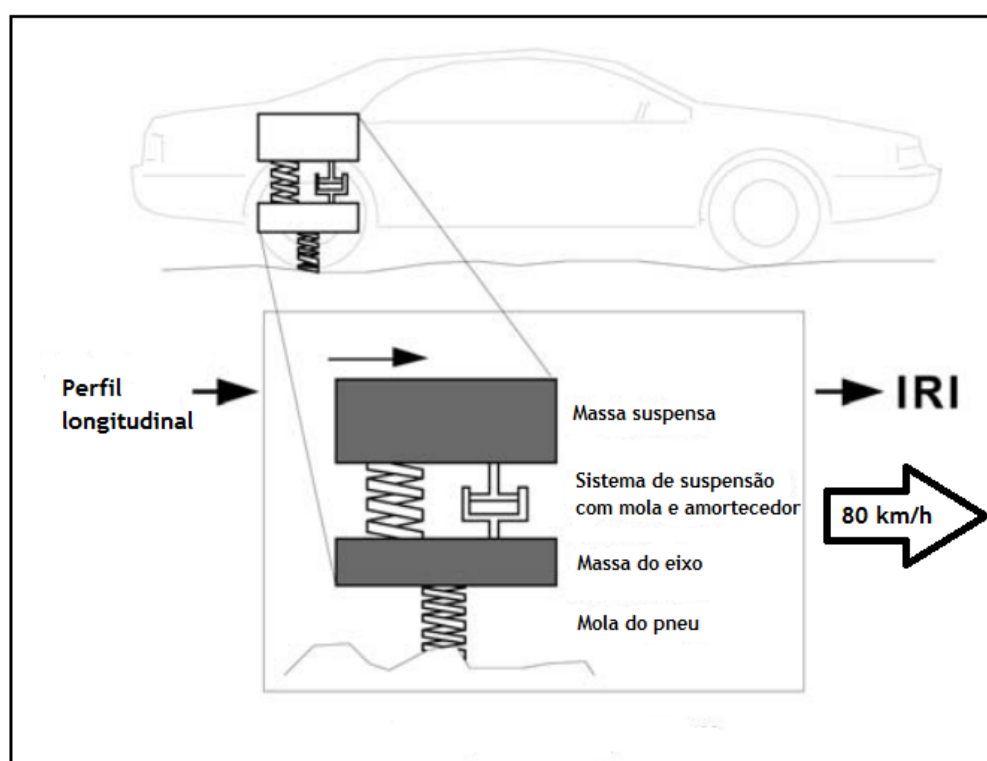


Figura 3.4 - Modelo matemático “quarto de veículo” utilizado na determinação do IRI (adaptado de ACPA, 2002)

Este modelo é fundamentado no modelo do “quarto de veículo”, ou seja, permite representar a reacção de um pneu numa suspensão de um veículo às irregularidades na superfície do pavimento, para uma velocidade de 80 km/h. Basicamente, os dados considerados pelo modelo são um conjunto de informações que descrevem as constantes das molas e amortecedores, assim como da massa suspensa (corpo do veículo) e não suspensa (pneu), que actuam sobre o pavimento.

A medição da irregularidade longitudinal pode ser efectuada através de dois grupos principais de equipamentos: os do tipo resposta e os do tipo perfilómetro (Fontul, 2006).

Os equipamentos do tipo resposta proporcionam uma resposta da suspensão de um determinado veículo ou atrelado, quando este circula, a determinada velocidade, sobre a superfície ensaiada. Como resultado obtém-se um número de impulsos correspondentes aos deslocamentos relativos quadro-eixo, para determinadas classes de amplitude desses deslocamentos. Um exemplo deste tipo de equipamentos é o “Wisconsin Road Meter”.

Os equipamentos do tipo perfilómetro efectuam o levantamento do perfil através de sensores que não contactam directamente com a superfície, do tipo laser, ou do tipo ultra-sons, obtendo-se como resultado o perfil longitudinal do pavimento. Os equipamentos mais representativos são o Perfilómetro Inercial (APL, *Analyseur du Profil en Long*) e o Perfilómetro Laser (figura 3.5).

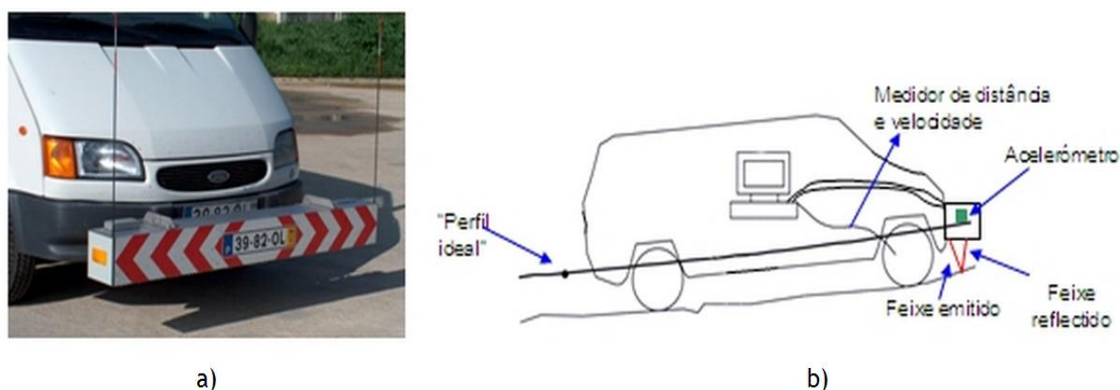


Figura 3.5 - a) Perfilómetro Laser; b) Esquema de funcionamento de um Perfilómetro Laser (LNEC, 2007)

Segundo Menezes (Menezes, 2008), após alguma evolução nestes equipamentos, é possível constatar que:

- i. Os equipamentos baseados na resposta dinâmica de um veículo, devido à dificuldade de manter a fiabilidade ao longo do tempo, estão a ser abandonados;
- ii. Os equipamentos baseados na obtenção de uma “imagem” do perfil do pavimento, os perfilómetros, em diferentes versões, são os mais utilizados.

No entanto, equipamentos como os referidos acima são muito dispendiosos, não havendo a possibilidade de os adquirir por parte de algumas organizações que pretendem efectuar a medição de IRI nos seus estudos. Assim, quando não é possível fazer sistematicamente o levantamento do IRI de forma automática, quantifica-se o IRI em função das degradações superficiais, como o exemplo adoptado por Picado Santos et al (Picado-Santos et al, 2006) apresentado no quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Quantificação do IRI na ausência de levantamento automático (adaptado de Picado-Santos et al, 2006)

Degradação	Condição	Nível	Descrição Nível de Gravidade	Área afectada/valor adoptado	IRI
Fendilhamento Pele de crocodilo	$\leq$	1	Malha com fendilhamento de abertura de pequena dimensão e sem ascensão de finos (abertura < 2mm e malha > 20cm)	Largura do trecho × comprimento afectado	Tipo 1: IRI=1500 mm/km
e					
Peladas, Desagregações superficiais, Exsudação do betume, etc.	$\leq$	1	Anomalia com largura < 30cm	0,5m × comprimento afectado	
e					
Rodeiras	$\leq$	1	Profundidade máxima da rodeira < 10mm	10mm	
					Tipo 2: IRI=2500 mm/km
Fendilhamento Pele de crocodilo	=	3	Malha com fendilhamento de abertura de grande dimensão com perda de material e ascensão de finos (Fendas com abertura > 4mm e malha < 40cm)	Largura do trecho × comprimento afectado	Tipo 3: IRI=3500 mm/km
ou					
Peladas, Desagregações superficiais, Exsudação do betume, etc.	=	3	Anomalia com largura > 100cm ou várias anomalias de qualquer largura na mesma secção transversal	Largura do trecho × comprimento afectado	
e					
Rodeiras	$\geq$	2	10mm < Profundidade máxima da rodeira < 25 mm	25 mm	

### 3.2.4. Metodologias de avaliação da qualidade dos pavimentos

Os pavimentos caracterizam-se por ser estruturas onde, ao longo do tempo, se verifica uma evolução significativa do seu estado. Devido a este facto, a observação desta evolução adoptando a periodicidade adequada de cada parâmetro a observar é uma tarefa fundamental.

Assim, a avaliação da qualidade de um pavimento rodoviário é a componente dos sistemas de gestão de pavimentos que procura compreender se os padrões de qualidade de serviço predefinidos estão a ser atingidos, usando para tal a avaliação do estado observado (estrutural e funcional) (Matos, 1997).

A avaliação estrutural da qualidade de um pavimento procura definir o estado de degradação da estrutura do pavimento e avaliar a capacidade de suporte de cargas para as quais foi projectado, sob a acção de determinadas condições climáticas. Já a avaliação da qualidade funcional tem por objectivo definir, face às exigências dos utentes das estradas, a qualidade do pavimento, nomeadamente quanto ao conforto e à segurança de circulação.

A qualidade estrutural e funcional dos pavimentos pode ser determinada através de índices que recorrem à análise de dados caracterizadores do pavimento, obtidos a partir de observações *in situ*. A informação obtida é assim fundamental para a caracterização de um pavimento num determinado instante.

A avaliação da qualidade dos pavimentos pode ser realizada segundo três metodologias diferentes (Branco et al, 2008):

- Avaliação Global;
- Avaliação Paramétrica;
- Avaliação Mista.

Seguidamente apresenta-se uma breve descrição para cada uma destas metodologias usadas para avaliação da qualidade dos pavimentos abordando alguns aspectos fundamentais das mesmas.

### ***Avaliação Global***

Este tipo de avaliação tem como principal objectivo o de procurar fornecer uma informação sobre o estado do pavimento através de um único índice (índice global), de modo a classificar esse mesmo pavimento. O índice global obtido resulta da associação dos diferentes “parâmetros de estado” (determinadas características de um pavimento que permitem obter uma avaliação do seu estado, por exemplo: capacidade de suporte, profundidade de rodeiras, irregularidade, etc.) utilizando um determinado algoritmo de cálculo, onde cada parâmetro de estado terá um determinado peso que depende de diversos factores, nomeadamente da política de conservação e do estado de desenvolvimento da rede rodoviária.

Esta metodologia apresenta vantagens e desvantagens. Entre as vantagens é possível destacar a facilidade de classificação do estado dos pavimentos mediante a atribuição de uma única nota e a representação cartográfica clara e eficiente do estado dos pavimentos da rede rodoviária, particularmente para apoio aos decisores na área da conservação. Já como desvantagens podem ser apontadas a possibilidade da mesma nota representar diferentes estados de pavimento, devido ao facto dos níveis de cada parâmetro poderem compensar-se entre si, e a dificuldade na definição dos coeficientes de ponderação a atribuir a cada parâmetro considerado no algoritmo de cálculo da nota global.

Relativamente aos índices globais característicos deste tipo de metodologia, faz-se referência aos seguintes (Paterson, 1987):

i. PSI - “Present Serviceability Index”. Resultou dos estudos do ensaio AASHO (“American Association of State Highways Officials”), constituindo o índice global mais amplamente utilizado. A obtenção deste índice global resultou da aplicação da técnica de regressão linear à informação obtida no ensaio rodoviário AASHO que avaliou várias estradas nos estados norte americanos de Illinois, Minnesota e Indiana entre 1958 e 1960, apresentando a seguinte equação para os pavimentos flexíveis (HRB, 1962):

$$PSI = 5.03 - 1.9 \times \log(1 + SV) - 0.01 \times (C + P)^{0.5} - 0.002139 \times RD^2 \quad (3.2)$$

Onde:

SV - é a variância de desníveis do perfil longitudinal;

C - é a extensão que apresenta fendilhamento e pele de crocodilo em m por 1000m<sup>2</sup>;

P - é a superfície com reparações em m<sup>2</sup> por 1000m<sup>2</sup>;

RD - é a profundidade média das rodeiras em mm.

De acordo com estudos efectuados utilizando a informação proveniente do ensaio AASHO, chegou-se à conclusão que a irregularidade longitudinal do pavimento (representada na expressão pelo parâmetro SV) contribuía com cerca de 95% para o cálculo do PSI, e por isso, também para a descrição do estado do pavimento (Yoder e Witzark, 1975).

A escala de valores que o índice PSI apresenta é de 0 a 5, correspondendo o valor mínimo do PSI (0 - zero) a um pavimento muito degradado, e o máximo (5 - cinco) a um pavimento em boas condições, como faz referência o quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Avaliação da qualidade dos pavimentos através do índice PSI (Paterson, 1987)

PSI	Classificação
0 - 1	Muito mau
1 - 2	Mau
2 - 3	Regular
3 - 4	Bom
4 - 5	Muito bom

O índice global PSI é o mais conhecido e o mais aplicado em Portugal para a avaliação global da qualidade de pavimentos, constituindo o índice adoptado pela administração rodoviária portuguesa (EP, S.A.) para avaliação do estado dos pavimentos da rede rodoviária nacional.

No ponto seguinte deste documento serão abordadas informações mais detalhadas sobre este índice e ainda as adaptações ao cenário português.

ii. Nota global R. Utilizado pelo sistema de gestão de pavimentos do estado de Washington, obtendo-se valores que variam de 0 a 100 por ordem crescente de qualidade. Este índice é resultante do produto de um índice estrutural por um índice funcional, como se apresenta na equação 3.3 (Caroff et al, 1989):

$$R = (100 - D)[1 - 0.3(CPM/5000)^2] \quad (3.3)$$

Onde:

R - é a nota global;

D - é a soma ponderada dos diferentes tipos de degradações, considerando coeficientes de ponderação que têm em consideração a gravidade e extensão de cada uma das degradações;

CPM - é a medição da irregularidade longitudinal por cada milha através do perfilómetro PCA (“Portland Cement Association”).

A primeira parcela desta equação representa o índice da qualidade estrutural, enquanto que a segunda diz respeito ao índice funcional. Uma das características mais importantes deste índice, ao contrário do que se verifica com o PSI, prende-se com o facto de a irregularidade longitudinal ter uma contribuição reduzida para o cálculo da nota global R.

No caso deste índice global, a irregularidade longitudinal tem uma contribuição reduzida no cálculo de R.

iii. PCI - “Pavement Condition Index”. Desenvolvido pelo sistema de gestão do estado de Ontário, OPAC (“Ontario Pavement Analysis of Costs”) (Prakash et al, 1993). O índice global PCI é obtido a partir da consideração de dois índices: o RCR (“Riding Condition Ratio”) e o DMI (“Distress Manifestation Index”). O primeiro índice representa a qualidade funcional dos pavimentos, dependendo apenas da irregularidade longitudinal. É de notar a elevada importância deste parâmetro na avaliação da qualidade funcional do pavimento, já que é o único a ser considerado. O índice DMI representa a qualidade estrutural dos pavimentos, resultante da avaliação da densidade e da gravidade de 15 tipos de degradações. O índice global PCI, à semelhança da nota global R, apresenta valores numa escala de 0 a 100, sendo calculado a partir da seguinte equação:

$$PCI = 100 \times (0.1 \times RCR)^{1/2} \times \left( \frac{205 - DMI}{205} \right) \quad (3.4)$$

Os índices RCR e DMI da equação são obtidos através do cálculo das seguintes expressões (Prakash et al, 1993):

$$RCR = 14.85 - 6.18 \times \log(PURD) \quad (3.5)$$

$$DMI = \sum_{i=1}^{15} W_i \times (S_i + D_i) \quad (3.6)$$

Onde:

RCR - traduz uma avaliação das condições de circulação (Riding Condition Ratio);

PURD - é o desvio padrão da aceleração vertical obtida com o aparelho PURD (Portable Universal Roughness Device), representando a irregularidade longitudinal;

DMI - é o índice que traduz o aparecimento de uma determinada degradação;

$W_i$  - é o índice de ponderação que representa o peso relativo para a degradação  $i$ . Degradações mais graves têm valores maiores de ponderação;

$S_i$  - é o valor que representa a gravidade da degradação  $i$ ;

$D_i$  - é o valor que representa a densidade da degradação  $i$ ;

### ***Avaliação Paramétrica***

A avaliação paramétrica é uma metodologia mais precisa e mais exaustiva na busca de informação sobre estado do pavimento do que a metodologia anterior. Este tipo de metodologia funciona tendo como base a definição de classes para cada um dos parâmetros de estado considerados relevantes para a caracterização do estado do pavimento.

Geralmente, estas classes são definidas em função das consequências que o estado do pavimento correspondente a cada uma delas terá, tanto para a qualidade estrutural do pavimento como para a funcional, ou seja, neste caso para o utente (Pereira e Miranda, 1999). Ao ter que considerar vários parâmetros de estado caracterizadores do pavimento em separado, este tipo de metodologia exige uma análise muito exaustiva, permitindo assim uma definição mais precisa do estado do pavimento e uma melhor definição do tipo de intervenção de conservação que deverá ser adoptado em cada fase da vida do pavimento.

O sistema Finlandês e o sistema Francês são dois exemplos de metodologias de avaliação paramétrica (OCDE, 1994).

No sistema Finlandês são considerados os seguintes parâmetros de estado:

- Capacidade de suporte (5 classes caracterizadas por módulos de deformabilidade);
- Fendilhamento e reparações (3 classes);
- Rodeiras (3 classes);
- Irregularidade longitudinal - IRI (3 classes).

Os valores de cada classe destes parâmetros de estado são definidos em função do conhecimento da rede e da relação do correspondente estado do pavimento para cada componente de qualidade (estrutural e funcional).

O parâmetro que tem maior peso na avaliação da qualidade e, posteriormente, na definição dos trabalhos de conservação, é o que representa as degradações superficiais, seguindo-se a capacidade de suporte.

Já o sistema Francês de avaliação da qualidade considera uma avaliação paramétrica de acordo com três objectivos de conservação dos pavimentos da rede rodoviária, são eles:

- A manutenção da estrutura - cujos parâmetros de avaliação são a deflexão e as degradações;
- A integridade da camada superficial - cujos parâmetros de avaliação são as degradações;
- A segurança e o conforto - cujos parâmetros de avaliação são a irregularidade longitudinal, o atrito transversal e as degradações.

### ***Avaliação Mista***

A avaliação mista, como o próprio nome indica, pretende, eliminar os inconvenientes da análise global e manter as vantagens da análise paramétrica. Deste modo, este tipo de avaliação combina as diferentes classes dos diferentes parâmetros de estado, de maneira a definir classes de estado de conservação de cada trecho de pavimento observado, utilizando grelhas de dupla ou tripla entrada.

Exemplos de metodologias de avaliações mistas são as utilizadas pelo sistema de gestão do estado da Califórnia e a desenvolvida para o sistema de gestão da ex-Junta Autónoma de Estradas - JAE (Pereira e Miranda, 1999).

A primeira metodologia, utilizada na Califórnia, considera os seguintes parâmetros (Paterson, 1987):

- Irregularidade longitudinal medida com o equipamento “Mays Meter”;
- Degradações observadas à superfície dos pavimentos.

As degradações são consideradas em famílias, sendo quantificadas quanto ao tipo, extensão (ou densidade de ocorrência) e quanto à respectiva gravidade, por trechos de 60 metros de extensão.

Por outro lado, o sistema de gestão da JAE considera uma grelha de tripla entrada, onde se consideram três parâmetros classificados em classes:

- Capacidade de suporte (3 classes) - em função dos valores observados da deflexão e da classe do tráfego pesado (TMDA<sub>p</sub>);
- O estado superficial dos pavimentos (10 classes) - em função da densidade das degradações e da respectiva gravidade;
- A irregularidade longitudinal (3 classes) - em função dos respectivos valores observados (NBO - “Notation par bandes d’Ondes”) e da classe do tráfego (TMDA).

Ao considerar estes três parâmetros e as respectivas classes, é possível definir 90 estados possíveis para cada trecho do pavimento através de uma grelha de tripla entrada.

### 3.2.5. Present Serviceability Index

O tipo de avaliação a adoptar no estudo que aqui se apresenta é a baseada na avaliação global da qualidade do pavimento, a qual permite a determinação de um índice de qualidade global.

A obtenção de um índice global de qualidade permite, no caso dos pavimentos flexíveis, que representam 99% da rede nacional, a caracterização do estado dos pavimentos em função das informações obtidas através de um levantamento visual do pavimento (Picado-Santos et al, 2006).

Tendo em conta as metodologias apresentadas, foi considerado neste estudo, para caracterizar o estado dos pavimentos e posteriormente o seu efeito no custo adicional de operação dos veículos, o índice PSI ou IQ (Índice de Qualidade), como alguns autores portugueses optaram por o designar. Esta escolha deve-se ao facto de este ser o índice que actualmente é usado pela administração rodoviária portuguesa, facilitando a obtenção dos dados e a compatibilização da metodologia proposta com o modelo de gestão de pavimentos em funcionamento.

Para a determinação deste índice é necessário obter informação a respeito de um conjunto de degradações superficiais dos pavimentos (gravidade da degradação e área afectada), o que pode ser obtido facilmente por inspecção visual dos mesmos. As degradações superficiais normalmente consideradas na determinação do PSI são o fendilhamento, a pele de crocodilo, as covas, as peladas, as rodeiras, as reparações e ainda um parâmetro que traduz a irregularidade longitudinal do pavimento.

Como já foi referido anteriormente, a fórmula original de cálculo do PSI resultou de informação obtida no ensaio rodoviário AASHO e é dada pela expressão 3.2 (página 45). A fórmula de cálculo do PSI que se vai adoptar neste estudo resultou da alteração dessa fórmula inicial.

Deste modo, no ano de 1996, a equação desenvolvida durante o ensaio AASHO foi modificada, obtendo-se uma nova versão que foi utilizada no Sistema de Gestão de Pavimentos (SGP) do Estado do Nevada, apresentando a seguinte forma (Sebaaly et al, 1996) (Ferreira et al, 2000) (Ferreira, 1997):

$$PSI_t = 5 \times e^{-0.0002598 \times IRI_t} - 0.002139 \times R_t^2 - 0.03 \times (C_t + S_t + P_t)^{0.5} \quad (3.7)$$

Onde:

$IRI_t$  - é a irregularidade longitudinal do pavimento no ano t (mm/km);

$R_t$  - é a profundidade média das rodeiras no ano t (mm);

$C_t$  - é a área com fendilhamento e pele de crocodilo no ano t ( $m^2/100m^2$ );

$S_t$  - é a área com degradação superficial de materiais (covas e peladas) no ano  $t$  ( $m^2/100m^2$ );  
 $P_t$  - é a área com reparações no ano  $t$  ( $m^2/100m^2$ ).

O valor máximo de PSI que foi obtido através de cálculos efectuados com informação proveniente de situações reais é de aproximadamente 4.5, valor este alcançado após a construção do pavimento (Santos, 2002).

No extremo oposto, existem recomendações de valores limite de PSI que representam pavimentos que não exibem características suficientes para a circulação dos veículos em condições de segurança e conforto, isto é, o valor de PSI não deve descer abaixo de um valor de referência, que representa também o estado para o qual as intervenções são menos dispendiosas. Desta maneira, nas aplicações efectuadas em Portugal, adoptou-se o valor de referência 2.5 para a rede urbana (por exemplo na avaliação dos pavimentos da cidade de Lisboa) e de 2.0 para a rede nacional, valor este adoptado no Sistema de Avaliação da Qualidade (SAQ) da EP, SA.

Quando o valor de PSI atinge estes valores, deve ser considerada a realização de trabalhos de reabilitação ou reconstrução para recuperar um nível aceitável de qualidade do pavimento, elevando o valor do índice PSI. A figura 3.6 é exemplificativa deste processo.

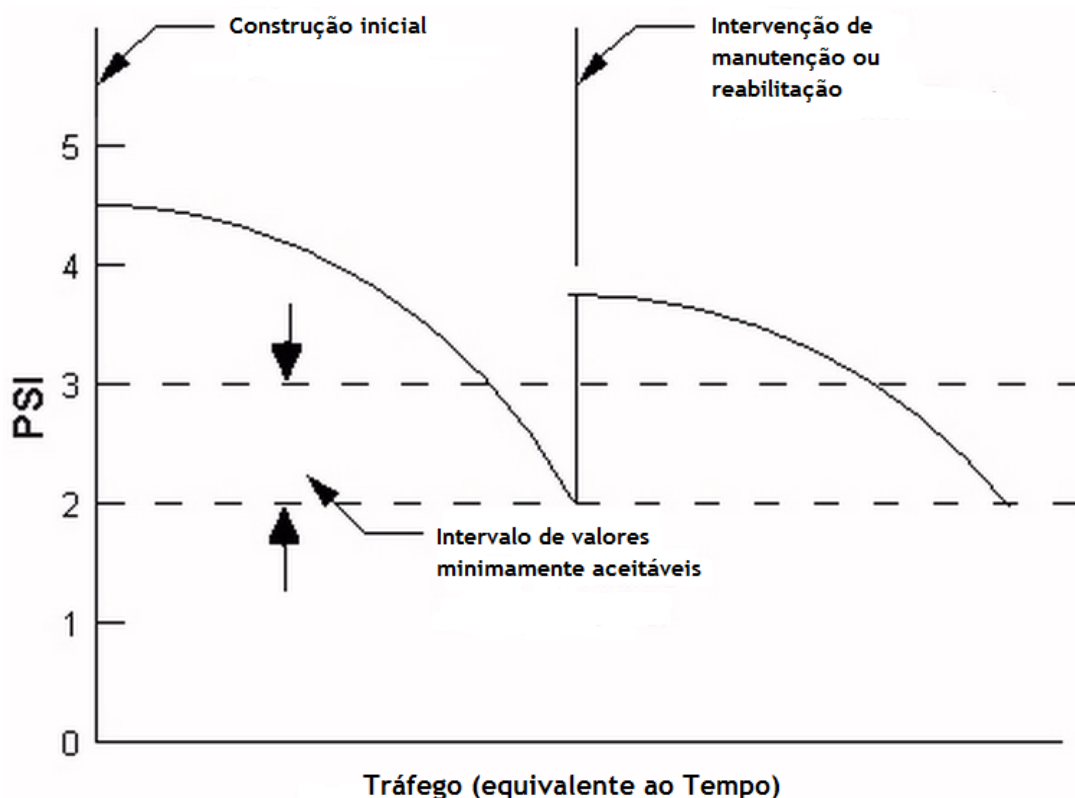


Figura 3.6 - Desempenho do pavimento avaliando o índice de qualidade PSI

No desenvolvimento efectuado pelas Universidades de Coimbra e do Minho sobre a estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para a administração rodoviária

portuguesa, no ano 2006, a expressão anterior do PSI foi modificada adaptando-a ao cenário da rede rodoviária nacional (Picado-Santos et al, 2006).

Na formulação desenvolvida, a contribuição da irregularidade foi reduzida para metade devido ao facto de, em geral, a obtenção do valor do IRI ser efectuada de forma indirecta, ou seja, na impossibilidade do IRI ser medido com equipamento específico, é feita a atribuição de uma classe IRI para cada secção em função das degradações dos pavimentos.

Tendo em conta o descrito, o peso da parcela do IRI foi alterado, multiplicando este índice por 1/2, isto é, reduzindo para metade o seu contributo. Com estas adaptações, a expressão obtida para a rede nacional foi a seguinte:

$$PSI_t = 5 \times e^{-0.0002598 \times IRI_t/2} - 0.002139 \times R_t^2 - 0.03 \times (C_t + S_t + P_t)^{0.5} \quad (3.8)$$

O quadro 3.6 apresenta, a título de exemplo, os pressupostos considerados para a aplicação da expressão anterior, definidos com base em cinco conjunturas de condições: a óptima (se se considerasse possível obter), a melhor (geralmente correspondente a um pavimento novo), a média da rede rodoviária portuguesa, a que define a necessidade de intervenção e a pior.

Quadro 3.6 - Índice global PSI para cinco conjunturas de condições do pavimento

Situação	IRI <sub>t</sub> [mm/km]	Profundidade média das rodeiras R <sub>t</sub> [mm]	% de Área degradada do trecho (C <sub>t</sub> + S <sub>t</sub> + P <sub>t</sub> )	PSI <sub>t</sub>
Óptima	0	0	0	5,0
Melhor	500	0	0	4,7
Média	2000	10	20	3,5
Necessidade de intervenção	3500	21	60	2,0
Pior	4250	35	100	0,0

### 3.3. Modelo de Cálculo dos custos médios de operação para a rede rodoviária portuguesa

#### 3.3.1. Formulação

Tendo por base a análise de diversas metodologias existentes para a determinação dos custos dos utentes das estradas, Bertha Santos propôs, em 2007, uma metodologia para a determinação deste tipo de custos, adaptada ao caso português e no âmbito da rede rodoviária nacional (Santos, 2007). No ponto 2.2.6. deste documento, foi já elaborada uma breve descrição deste modelo.

À semelhança das várias formulações que serviram de base à elaboração deste modelo, a formulação geral do modelo proposto considera o somatório das três parcelas principais de CUE: os COV, os CA e os CTP (também já descritas anteriormente), considerando ainda a possibilidade de incluir uma parcela referente à cobrança de portagens. Deste modo, a formulação geral do modelo de custos do utente da estrada proposto para o caso português, pode ser sintetizada, de uma forma simplificada, na seguinte equação:

$$CUE = COV + CA + CTP + CPortagem \quad (3.9)$$

Onde:

COV - é o Custo de Operação de Veículos;

CA - é o Custo dos Acidentes;

CTP - é o Custo do Tempo de Percurso;

CPortagem - é o Custo da cobrança de Portagens.

O funcionamento do modelo proposto assenta na consideração de quatro classes de veículos representativos: veículos ligeiros de passageiros, veículos comerciais ligeiros, veículos pesados de mercadorias e veículos pesados de passageiros.

No âmbito deste trabalho, interessa apresentar a formulação que permite calcular a parcela dos COV, já que é nesta que se pretende estudar o efeito do estado dos pavimentos. Assim, para a determinação dos custos de operação dos veículos o modelo incorpora um conjunto de equações que permitem calcular os custos associados ao consumo de combustível, pneus, manutenção preventiva e desvalorização dos veículos. Estas constituem uma simplificação das equações utilizadas pelo modelo do HDM-4, baseando-se no princípio de que a determinação dos custos para determinada componente de COV é dada pelo produto do consumo de cada componente pelo custo unitário da mesma, por unidade de comprimento. No ponto seguinte deste documento é apresentada a proveniência dos dados de consumo usados no modelo.

As componentes consideradas nos cálculos dos COV foram aquelas que apresentavam impactos médios a elevados no total dos CUE, correspondendo às usadas no HDM-4 à excepção da componente do óleo, por se tratar de uma componente de baixo impacto no total dos CUE, e pela sua consideração estar de alguma forma incorporada nos custos de manutenção preventiva dos veículos.

No quadro 3.7 são descritas as razões que levaram à escolha das componentes de COV (combustível, pneus, manutenção e desvalorização) e ainda o grau do seu impacto nos custos totais dos utentes da estrada.

Quadro 3.7 - Componentes do modelo de COV proposto e impacto nos CUE (Santos, 2007)

Componente do COV	Impacto no CUE
<b>Combustível</b>	Componente de <b>maior impacto</b> nos COV e CUE, comprovado pelos inúmeros estudos já efectuados sobre o consumo de combustível e o seu custo para o utente.
<b>Pneus</b>	Componente considerada de baixo impacto pelo HDM-4, mas encarada como de <b>impacto médio</b> para o caso português devido à importância do transporte rodoviário nacional e internacional de mercadorias e passageiros, já que este se efectua maioritariamente através da rede rodoviária principal. Especialmente significativo para o caso dos veículos pesados.
<b>Manutenção</b>	Componente de <b>impacto médio</b> que influencia outras componentes do COV, em especial o consumo de combustível e a desvalorização. Também influencia os CTP e CA. Componente mais importante da determinação dos benefícios decorrentes da elaboração de melhoramentos na estrada.
<b>Desvalorização</b>	Componente de <b>impacto médio</b> , tendo em conta que o capital investido na aquisição do veículo é sujeito a desvalorização devido à idade, uso e avanço tecnológico dos veículos.

No seguimento da descrição do modelo de custos de operação dos veículos, são apresentadas de seguida as equações e respectivas unidades que permitem a determinação destes custos, para um determinado TMDA e correspondente composição, por quilómetro de estrada:

$$COV = TMDA \times \sum_{i=1}^4 (COV_i \times p_i), \left[ \frac{\text{€}}{\text{km}} / \text{dia} \right] \quad (3.10)$$

$$COV_i = Cc_i + Cp_i + Cm_i + Cd_i, \left[ \frac{\text{€}}{\text{km}} / \text{veículo} \right] \quad (3.11)$$

$$Cc_i = cc_i \times Cmc_i, \left[ \frac{1}{\text{km}} \times \frac{\text{€}}{1} = \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (3.12)$$

$$Cp_i = \frac{np_i \times Cmp_i}{pvp_i}, \left[ \frac{pneus \times \frac{\text{€}}{pneu}}{\text{km}} = \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (3.13)$$

$$Cm_i = \frac{Cmmt_i}{pvv_i \times kma_i}, \left[ \frac{\text{€}}{\text{anos} \times \frac{\text{km}}{\text{ano}}} = \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (3.14)$$

$$Cd_i = \frac{Cmtd_i}{pvv_i \times kma_i}, \left[ \frac{\text{€}}{\text{anos} \times \frac{\text{km}}{\text{ano}}} = \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (3.15)$$

Onde:

i corresponde à classe de veículo, ou seja:

i=1 para veículos ligeiros de passageiros;

i=2 para veículos comerciais ligeiros;

i=3 para veículo pesados de mercadorias;

i=4 para veículos pesados de passageiros;

TMDA é o tráfego médio diário anual da secção rodoviária, em veículos/dia;

$COV_i$  é o custo de operação do veículo da classe  $i$ , em €/km;

$Cc_i$  é o custo do combustível para o veículo da classe  $i$ , em €/km;

$Cp_i$  é o custo dos pneus para o veículo da classe  $i$ , em €/km;

$Cm_i$  é o custo da manutenção para o veículo da classe  $i$ , em €/km;

$Cd_i$  é o custo de desvalorização do veículo da classe  $i$ , em €/km;

$p_i$  é a proporção dos veículos da classe  $i$  para o TMDA da secção rodoviária considerada, em valor decimal;

$cc_i$  é o consumo de combustível do veículo da classe  $i$ , em l/km;

$Cmc_i$  é o custo de mercado do combustível (gasolina ou gasóleo), em €/l;

$np_i$  é o número de pneus do veículo da classe  $i$ ;

$Cmp_i$  é o custo de mercado de um pneu para o veículo da classe  $i$ , em €/pneu;

$pvp_i$  é o período de vida médio do pneu para o veículo da classe  $i$ , em km;

$Cmmt_i$  é o custo de mercado da manutenção total (ao longo do período de vida do veículo), para o veículo da classe  $i$ , em €;

$pvv_i$  é o período de vida útil do veículo da classe  $i$ , em anos;

$kma_i$  é a quilometragem média anual percorrida pelo veículo da classe  $i$ , em km/ano;

$Cmdt_i$  é o custo de mercado da desvalorização total (ao longo do período de vida do veículo), para o veículo da classe  $i$ , em €.

Por fim, há que salientar que, durante o processo de definição da formulação, esteve sempre presente o objectivo de obter um modelo de fácil compreensão, utilização e calibração. Para além desta simplicidade e facilidade de aplicação, uma das vantagens indiscutíveis do modelo, é a possibilidade de proceder à determinação de CUE actualizados de forma rápida e fiável (numa base anual, se desejado), já que a informação de consumos e custos necessária corresponde, na sua maioria, a dados oficiais disponibilizados anualmente por entidades de reconhecida idoneidade.

### **3.3.2. Informação necessária ao funcionamento do modelo**

Para que o modelo português de CUE funcione é necessária a aquisição de um conjunto de informação, isto é, de dados ou parâmetros que permitam realizar a modelação dos custos. Dentro do conjunto de parâmetros de entrada necessários, é possível diferenciar três tipos de informação: a informação específica sobre a rede em análise, a informação referente aos valores médios de consumos e custos e a informação relativa aos parâmetros necessários à sua definição. Assim, dentro da primeira categoria é necessário recolher informação referente a:

- Extensão da rede a analisar;
- Tráfego Médio Diário Anual (TMDA) da rede;
- Repartição do TMDA por classes de veículos: Veículos Ligeiros de Passageiros (VLP), Veículos Comerciais Ligeiros (VCL), Veículos Pesados de Mercadorias (VPM) e Veículos Pesados de Passageiros (VPP);

- Tipo de itinerário e velocidades médias de circulação praticadas pelos veículos;
- Dados de sinistralidade rodoviária;
- Custo da taxa de portagem (virtual ou real).

No que concerne à segunda categoria que incorpora informação relativa aos valores médios de consumos e custos, tendo em conta que o valor do custo ou consumo varia para cada classe de veículo representativo, diferenciam-se os seguintes dados:

- Consumo médio de combustível (gasolina e gasóleo);
- Preço de mercado dos combustíveis;
- Preço de mercado dos pneus;
- Custo de manutenção preventiva para o período de vida dos veículos;
- Custo de desvalorização para o período de vida dos veículos;
- Custo da assistência aos acidentes;
- Custo das vítimas.

Na última categoria de informação, relativa aos parâmetros necessários apontam-se os seguintes dados necessários:

- Quilometragem média anual dos veículos de cada classe;
- Período médio de vida dos pneus;
- Período de vida para cada classe de veículo;
- Número de pneus por veículo;
- Taxas de ocupação dos veículos.

Todas as informações necessárias para a determinação das componentes dos COV consideradas baseiam-se, tendo em conta o ano base de 2006 (com custos actualizados posteriormente para o ano 2010) e o cenário português, em dados nacionais com proveniência em entidades oficiais ou associações que efectuaram a recolha e tratamento periódico deste tipo de informação, assim como em dados disponibilizados por empresas transportadoras com gestão de frotas ou prestadoras dos serviços que se pretendem caracterizar.

Para facilitar a obtenção de alguns dados necessários à determinação dos CUE, principalmente os associados aos COV, foram adoptados veículos representativos para cada classe de veículo considerada, tendo em conta as estatísticas nacionais das marcas e modelos mais vendidos em 2006 (ver quadro 3.8).

O Quadro 3.8 mostra as principais informações definidas para os dois tipos principais de classes de veículos do modelo: os VLP e os VPM. Para informações mais pormenorizadas sobre estas classes e sobre as restantes classes consideradas (comerciais ligeiros e pesados de passageiros) é possível consultar a descrição do modelo de CUE em Santos, 2007.

Quadro 3.8 - Parâmetros de entrada do modelo de CUE, Portugal (2006) (Santos et al, 2009b)

Parâmetro	VLP				VPM			
Veículo representativo	Renault Clio III 1.2 16V				DAF FT 95 430 S 380 com semi-reboque			
	Veículos mais vendidos em PT							
Velocidades médias de circulação (km/h)	EN/ER	IC	IP	AE	EN/ER	IC	IP	AE
	70	80	90	120	50	60	80	100
	Definidas em função das normas portuguesas e das classes de veículo							
Período de vida dos veículos (anos)	10				12			
	Definidos em função dos valores de referência utilizados pelos modelos estudados e da desvalorização dos veículos em PT							
Quilómetros por ano (km/ano)	20000				85000			
	Definidos em função dos valores de referência utilizados pelos modelos estudados e em dados oficiais portugueses							
Taxa de ocupação (ocupantes/veículo)	2 (1 condutor em trabalho + 1 passageiro em “não-trabalho”)				1 Condutor em trabalho			
	Definidas em função dos valores de referência utilizados pelos modelos estudados e em dados oficiais portugueses							
Combustível	Consumos médios: Gasolina: 5.9 L/100km Diesel: 4.8 L/100km Preço de mercado (Junho/2007): Gasolina 95: 1.379 €/L Gasóleo: 1.059 €/L				Consumos médios: Diesel: 44.0 L/100km Preço de mercado (Junho/2007): Gasóleo: 1.059 €/L			
	Valores definidos em função dos consumos dos veículos representativos (para os VLP), de dados de consumos oficiais portugueses (para os VPM) e dos custos de mercado à data indicada.							
Pneus	4 pneus/veículo 40000 km Preço de mercado: 70 €/pneu				12 pneus/veículo 200000 km Preço médio de mercado: 455 €/pneu			
	Valores definidos em função dos veículos representativos e dos custos de mercado							
Manutenção preventiva	1515€/10 anos				26940€/12 anos			
	Valores definidos em função dos veículos representativos e dos custos de mercado							
Desvalorização	16510€/10 anos				81172€/12 anos			
	Valores definidos em função dos veículos representativos e dos custos de mercado							
Custo do tempo de percurso	6.00€/h (em trabalho)				9.06€/h (em trabalho)			
	Dados oficiais portugueses do MTSS (Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social)							
			Com feridos ligeiros		Com feridos graves		Com vítimas mortais	
	Assistência policial		53.40		148.80		232.80	
	Assistência médica		16.80		96.40		96.40	
	Assistência policial e médica definidas em função de dados de organismos portugueses							
Custos das vítimas (€/vítima)	Feridos ligeiros: 40000 €/vítima Feridos graves: 90000 €/vítima Vítimas mortais: 500000 €/vítima							
	Definidos em função dos valores de referência nacionais, internacionais e dos valores utilizados nos modelos estudados							
Custo de portagem (€/km)	0.07€/km				0.18€/km			
	Dados definidos em função dos custos médios de portagem real praticados em Portugal							

Nota:

EN/ER - Estradas Nacionais e Regionais com duas vias de circulação

IP/IC - Itinerários Principais e Complementares com duas vias de circulação

AE - Auto-estradas com faixas de rodagem unidireccionais com 2 vias ou mais por sentido de circulação.

### 3.4. Efeitos do estado dos pavimentos rodoviários no custo de operação dos veículos

Pretende-se neste ponto efectuar uma análise prévia ao efeito do estado dos pavimentos nos COV. Para isso abordam-se aspectos necessários à compreensão do tema e à análise efectuada no capítulo seguinte.

Como referido no ponto 2.2.6 deste documento, o Modelo Português de CUE, cuja formulação geral foi apresentada no ponto anterior, foi testado em dois casos práticos, tendo sido utilizada a informação referente a duas redes rodoviárias portuguesas concessionadas, a Scutvias e a Aenor. Com o intuito de testar a sensibilidade do modelo a variações dos parâmetros de entrada definidos na formulação e à importância de cada parcela de custo (COV, CTP, CA e CPortagem) nos CUE totais, efectuaram-se posteriormente diversos estudos de variabilidade, tendo como principal objectivo identificar os parâmetros sensíveis do modelo.

Esta análise consistiu assim em simular variações da ordem de 20 a 30% nos valores adoptados para certos parâmetros considerados sensíveis na bibliografia existente, isto é, parâmetros identificados como sendo susceptíveis de verificarem alterações em relação aos valores adoptados, influenciando os CUE totais. Os parâmetros inicialmente identificados como sensíveis foram: o consumo de combustível, o período de vida médio do pneu, a quilometragem média anual do veículo, o período de vida útil do veículo e a velocidade média de circulação.

O quadro 3.9 apresenta os resultados obtidos apenas para a análise da variabilidade das componentes da parcela dos COV. Quanto à análise dos parâmetros dos CTP, verificou-se que uma redução para 2/3 da velocidade considerada conduzia a um agravamento do CTP de 50%.

Quadro 3.9 - Análise da variabilidade dos parâmetros dos COV (Santos, 2007)

Classe de veículo	COV [€/km]	Combust.			Pneus			Manutenção preventiva			Desvalorização		
		+20% cc	+25% pvp	-25% pvp	+20% pvv	+25% kma	-25% kma	+20% pvv	+25% kma	-25% kma			
		Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]	Δ COV [%]		
VPL	0.1623	8.03	-0.86	1.44	-0.07	-0.93	1.55	-5.96	-7.76	8.97			
VCL	0.1074	8.87	-1.12	1.86	0.02	-0.15	2.31	-5.91	-3.92	6.53			
VPM	0.5993	15.55	-0.91	1.52	0.01	-0.04	0.06	-1.27	-2.66	4.43			
VPP	0.6733	11.33	-0.76	1.27	0.01	-0.02	0.04	-5.65	-7.36	12.27			

Onde:

cc - é o consumo de combustível do veículo (L/km);

pvp - é o período médio de vida dos pneus (km);

pvv - é o período de vida útil do veículo (anos);

kma - é a quilometragem média anual percorrida pelo veículo (km/ano).

Ao analisar o quadro 3.9, foi possível verificar que os COV são afectados de forma negativa (custo agravado) essencialmente pela variação do consumo de combustível e pela variação do parâmetro da quilometragem média anual (kma), considerado na determinação da desvalorização dos veículos. Assim, um aumento de 20% no consumo de combustível gerou aumentos entre os 8% (VLP) e 16% (VPM) nos COV, enquanto que na desvalorização, ao estabelecer aumentos de 20% no período de vida útil dos veículos e de 25% da quilometragem média anual permitiu obter uma diminuição média dos COV de 5% para o primeiro e de 3% (VPM) a 8% (VLP) para o segundo. Ainda na desvalorização, a diminuição de 25% na quilometragem média anual dos veículos aumenta os COV de 4% (VPM) a 12% (VPP). Em relação aos restantes parâmetros de COV estudados (Pneus e Manutenção Preventiva), a análise permitiu observar que as variações consideradas não influenciaram de forma significativa os COV, obtendo-se percentagens máximas de sensibilidade de cerca de 2%.

Os resultados obtidos mostraram desta forma que o modelo proposto, como a maioria dos existentes, é sensível principalmente a variações da velocidade média de circulação definida para cada classe de veículo e tipo de itinerário e ainda ao consumo e custo do combustível, constituindo os parâmetros críticos deste modelo (Santos, 2007).

Além de serem identificados como parâmetros críticos, a velocidade média de circulação e o custo e consumo de combustível, são também os principais factores na definição dos CTP e dos COV e aqueles que melhor traduzem as principais variações dos CUE devido ao estado ou qualidade dos pavimentos e aos troços em obras (de manutenção) ou reabilitação (Santos et al, 2009a).

Tendo em conta o âmbito do trabalho aqui apresentado, torna-se fundamental efectuar previsões das variações dos CUE que expressem os benefícios ou os custos adicionais associados a melhores ou piores níveis de qualidade do estado dos pavimentos, permitindo uma melhor consideração das condições reais das redes nas análises económicas de ciclo de vida realizadas.

A variação das velocidades de circulação devidas ao estado dos pavimentos pode ser facilmente considerada na determinação do CTP através da consideração de uma velocidade de circulação mais baixa. No entanto, neste documento, o contributo dos custos adicionais desta componente afectados pelo estado dos pavimentos é desprezado. A razão para que tal aconteça é o facto de se considerar que para o caso da rede nacional (rede considerada no âmbito deste trabalho) os pavimentos não chegam a atingir degradações tais que influenciem significativamente a velocidade média de funcionamento normal.

Há ainda um outro aspecto que é necessário realçar uma vez que é preponderante para as análises que se propõem neste trabalho. É possível verificar que um pavimento que apresente boa qualidade permite a circulação dos veículos a velocidades mais elevadas, com maior conforto e segurança, diminuindo deste modo também o custo do tempo de percurso e de acidentes. No entanto, esta conjugação de factores, que permite também uma diminuição dos COV em termos de pneus, manutenção e desvalorização do veículo, não conduz necessariamente a uma diminuição do consumo de combustível, já que como foi visto no ponto 2.2.1, o consumo de combustível aumenta com a prática de velocidades mais elevadas. Para os cenários de pavimentos em mau estado verifica-se a situação contrária. Deste modo, o combustível, apesar de ser como se afirmou um parâmetro crítico no cálculo dos COV, ou seja, se o seu consumo variar acentuadamente obtêm-se repercussões significativas nos COV, não é uma das componentes dos COV que faz diminuir os custos caso a qualidade do pavimento aumente.

Alguma da bibliografia existente indica aumentos significativos dos custos de operação para condições mais desfavoráveis do estado dos pavimentos. A maioria das pesquisas sobre a variação dos COV, em função do desempenho do pavimento, foi conduzida pelo Banco Mundial (Walls e Smith, 1998). A figura 3.7 mostra o efeito da irregularidade da estrada, medida pelo índice de irregularidade internacional (IRI), nos custos de operação obtidos num estudo na Nova Zelândia.

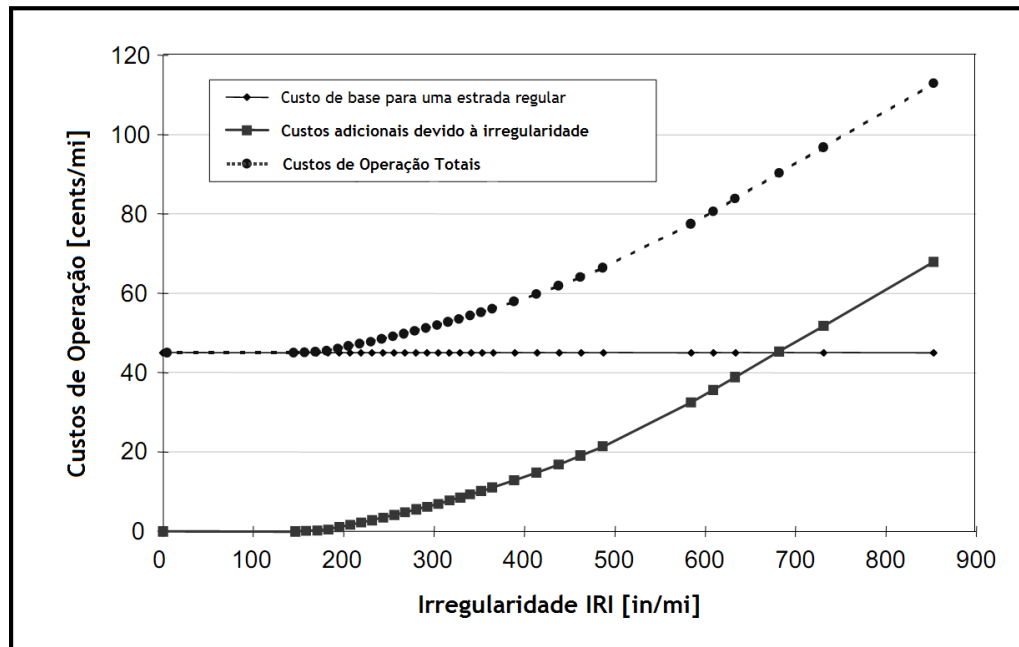


Figura 3.7 - Efeito da irregularidade nos custos de operação da Nova Zelândia (adaptado de Walls e Smith, 1998)

Onde:

in - Polegadas (“Inches”) (1 polegada corresponde a 0.0254 metros);

mi - Milhas (1 milha corresponde a 1.609 quilómetros);

cents - cêntimos do Dólar neozelandês.

Para facilitar a compreensão da figura, é importante referir que 1 m/km corresponde a cerca de 64 in/mi. Desta maneira, a figura mostra que os COV adicionais, em comparação com os custos de base de uma estrada regular, começam a ser gerados a partir de um IRI de 170 in/mi (aproximadamente 2,7 m/km). Este é precisamente o valor de referência do IRI no modelo de custos da JAE. É possível ainda observar que a partir deste valor os custos de operação vão aumentando de forma exponencial com o aumento do IRI.

Um outro estudo financiado pelo Departamento de Transporte do Minnesota nos EUA (Barnes e Langworthy, 2003) apresenta um quadro (3.10) onde é possível observar um conjunto de factores de correcção dos custos de operação dos veículos para diferentes qualidades do pavimento, traduzidos por diferentes valores de PSI e IRI. Estes factores de correcção foram baseados no estudo da ASTM (ASTM, 1983).

Quadro 3.10 - Efeitos da irregularidade do pavimento nos custos de operação (adaptado de Barnes e Langworthy, 2003)

PSI	IRI [in/mi]	IRI [m/km]	Factor de Correção
2.0 ou pior	170	2.7	1.25
2.5	140	2.2	1.15
3	105	1.7	1.05
3.5 ou melhor	80	1.2	1.00

Pelo quadro, verifica-se pelo estudo que a partir de um PSI de 3.5 e IRI igual ou inferior a 1.2, a qualidade do pavimento não terá qualquer impacto nos custos de operação, já que o factor de correcção é 1. Já na extremidade oposta, com valores de PSI na ordem de 2.0 ou inferior e IRI a partir de 2.7 obtêm-se factores de correcção de 1.25, isto é, acresce os custos operacionais em 25%.

Tendo em conta alguns estudos realizados ao longo dos anos e a análise de variabilidade mostrada no inicio deste ponto, chega-se à conclusão que existem componentes dos COV que são mais sensíveis que outras ao estado dos pavimentos. No mesmo estudo do quadro anterior, é ainda apresentado o quadro 3.11 onde se indica a susceptibilidade de variação das componentes dos COV a alguns aspectos, entre eles à irregularidade longitudinal do pavimento e à variação de custos de operação globais.

Pode-se então verificar que o combustível é a única componente que não é susceptível à variação da irregularidade do pavimento. Todas as outras componentes, umas mais que outras, como se verá, variam com diferentes valores da irregularidade do pavimento. Salienta-se ainda o facto de neste estudo os pneus e a desvalorização não contribuírem com

Quadro 3.11 - Susceptibilidade das componentes dos COV a vários parâmetros (adaptado de Barnes e Langworthy, 2003)

Componente do COV	Condições de congestionamento	Irregularidade do pavimento	Varição dos custos de operação globais
Combustível	Aumento significativo	Não	Sim
Manutenção	Aumento parcial	Sim	Sim
Pneus	Não	Sim	Não
Reparação	Aumento parcial	Sim	Sim
Desvalorização	Aumento parcial	Sim	Não

variações significativas nos custos de operação totais, ou seja, podem variar com o estado dos pavimentos mas a sua contribuição no peso total dos COV é tão pequena que não se obtêm variações significativas na globalidade.

Para o HDM-4, a componente dos COV mais sensível à condição do pavimento é a dos pneus, como se pode verificar pelo quadro 3.1 da página 35 deste documento. No entanto, tal como no estudo anterior, tem um baixo impacto nos custos de operação e nos custos dos utentes, como se pode visualizar no mesmo quadro.

Através de uma análise geral aos diferentes estudos que abordam esta temática foi possível desenvolver o quadro 3.12 que classifica as componentes dos COV quanto à sensibilidade ao estado do pavimento. Através dos dados do Modelo Português de CUE de 2007, onde se observou a percentagem com que cada componente contribui para os COV, foi possível comparar-se ainda a sensibilidade ao estado do pavimento com o impacto das componentes nos COV.

Quadro 3.12 - Sensibilidade ao estado do pavimento e impacto das componentes nos COV dos VLP e VPM (dados 2007)

		Combustível	Pneus	Manutenção e Reparação	Desvalorização
Sensibilidade ao Estado do Pavimento		Baixa	Elevada	Elevada	Média
Impacto nos COV [%]	VLP	39.9%	4.3%	4.9%	50.9%
	VPM	77.8%	4.5%	4.3%	13.4%

Assim, da leitura do quadro 3.12 é possível concluir que o combustível é uma componente que apresenta um grande impacto nos COV, com percentagens de cerca de 40% nos VLP e 78% nos VPM, mas que no entanto, a sua sensibilidade ao estado dos pavimentos é muito reduzida pelas razões já acima enunciadas. Sobra então a restante percentagem repartida pelas outras três componentes de COV. A desvalorização, apesar de ter uma sensibilidade média ao estado do pavimento, pode apresentar um forte contributo nos COV, devido à sua grande percentagem de impacto, principalmente nos VLP, em que ultrapassa os 50%. Os pneus e a

manutenção e reparação apresentam pequenas percentagens de impacto nos COV, variando entre os 4 e 5% neste modelo. Contudo estas componentes são de elevada sensibilidade ao estado do pavimento.

As percentagens de impacto nos COV exibidas no quadro acima podem variar de modelo para modelo e de país para país, representando os valores apresentados o cenário português.

Procura-se assim avaliar os efeitos/influência do estado dos pavimentos nos COV através do estudo de metodologias que têm vindo a ser aplicadas internacionalmente, em estudos respeitantes a esta matéria e nas informações existentes a respeito da rede rodoviária nacional.

Tendo em conta a situação descrita, torna-se bastante útil a definição e consideração de factores de correcção que, ao serem aplicados aos valores médios dos custos dos utentes obtidos com o modelo proposto para a rede rodoviária nacional, contemplem a previsão dos CUE adicionais ou os ganhos associados a troços rodoviários com determinada qualidade do pavimento. Deste modo, a definição de um factor de correcção passa pela incorporação, na formulação dos CUE, do estado dos pavimentos através da consideração de um índice de qualidade que represente o estado funcional e estrutural dos mesmos.

De modo a minimizar os custos adicionais provocados pelo estado dos pavimentos, é aconselhável garantir níveis elevados de qualidade de circulação através de um programa cuidado de manutenção e reabilitação dos pavimentos. Estes procedimentos permitem diminuir não só os COV, mas também o CTP e os CA, pois um bom estado dos pavimentos favorece a circulação dos veículos a velocidades mais elevadas e em condições de segurança mais favoráveis, diminuindo consequentemente o tempo despendido nas viagens (menor CTP) e o número e gravidade dos acidentes rodoviários (menor CA).

Concluindo sobre o efeito do estado do pavimento nos COV, é notório que os pneus, a manutenção e reparação e a desvalorização, são as componentes mais afectadas. As duas primeiras resultam directamente do efeito da condição do pavimento, enquanto que a desvalorização se pode considerar uma consequência destas.

Uma análise mais detalhada e sustentada pela apresentação dessas variações para alguns modelos em uso será efectuada no capítulo seguinte, servindo de base para a consideração do estado dos pavimentos na determinação dos COV.

## **4. Avaliação dos custos adicionais de operação dos veículos devido ao estado dos pavimentos rodoviários**

### **4.1. Introdução**

Concluída a introdução ao tema dos efeitos do estado dos pavimentos nos custos de operação dos veículos, através da análise e descrição de diversos aspectos associados a esta temática, parte-se neste capítulo para uma componente mais prática do tema, descrevendo e testando alguns modelos existentes e validando, à luz dos resultados encontrados, uma proposta de formulação para a rede rodoviária portuguesa. Para finalizar o capítulo, é efectuada uma aplicação dessa mesma proposta a uma rede de auto-estradas concessionada, a Scutvias (A23).

### **4.2. Modelos para determinação dos custos adicionais de operação dos veículos**

Ao longo dos anos foram surgindo vários modelos de custos dos utentes. Estes foram concebidos para se adequar às características dos países onde se pretende que sejam implementados. Na maioria destes modelos, o efeito do estado dos pavimentos e, conseqüentemente, os índices que representam a sua qualidade não eram considerados, nem no tratamento da componente específica dos COV, nem na globalidade dos custos para os utentes. No entanto, existem alguns modelos que contemplam na sua formulação análises que permitem obter variações dos custos mediante o acréscimo ou diminuição dos valores apresentados pelos índices de qualidade do pavimento, como é o caso do PSI, e de parâmetros ou características específicas da estrada, como o IRI. O IRI pode assim ser utilizado para avaliar o efeito do estado dos pavimentos, uma vez que a maioria das formulações existentes usam o IRI como principal parâmetro para calcular o PSI em redes nacionais de estradas.

Nos pontos seguintes deste capítulo apresenta-se uma análise de um conjunto de modelos que permitem considerar o efeito do estado dos pavimentos na determinação dos COV, separando-se os modelos que utilizam o PSI (ou índice de qualidade) e o IRI.

Geralmente, a análise efectuada por estes modelos baseia-se num determinado valor de referência do índice de qualidade do pavimento que corresponde a 100% do COV. Deste modo, a variação dos valores dos custos obtidos nos modelos devido à qualidade do pavimento é

obtida a partir da variação desse valor de referência. Esta é a forma geral adoptada para efectuar a análise nos diversos modelos que se apresentam seguidamente.

#### **4.2.1. Em função do PSI**

Neste ponto relativo aos modelos em que a análise do custo de operação em função do estado do pavimento é feita com recurso ao índice PSI são descritos dois estudos: o primeiro elaborado pelas Universidades de Coimbra e do Minho e o segundo elaborado em parceria pela “American Society for Testing and Materials” (ASTM) e Transportation Research Board (TRB). Estes estudos caracterizam-se por a análise dos diferentes custos obtidos ter sido realizada em função do índice global de qualidade PSI.

##### ***Estudo das Universidades de Coimbra e do Minho - 2006***

Este estudo (Picado Santos et al, 2006) teve como principal objectivo a descrição dos instrumentos usados no processo de desenvolvimento de um novo sistema de gestão de pavimentos (SGP) para a rede rodoviária portuguesa sob administração da EP - Estradas de Portugal. Deste modo, foi necessário avaliar a qualidade dos pavimentos da rede nacional de estradas, baseando-se a metodologia usada para o efeito numa análise global da qualidade do pavimento determinando um índice global de qualidade, o PSI. A fórmula de cálculo do PSI empregue no modelo é a dada pela expressão 3.8 apresentada no capítulo anterior.

Segundo a formulação descrita no estudo, a variação do custo de operação dos veículos pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$COV = 0.39904 - 0.03871 \times PSI + 0.00709 \times PSI^2 - 0.00042 \times PSI^3, \left[ \frac{\text{€}}{\text{km}} / \text{veículo} \right] \quad (4.1)$$

Uma vez que a expressão depende apenas do índice global de qualidade PSI, esta pode ser utilizada para a avaliar o efeito do estado do pavimento no custo de operação dos veículos. Desta maneira, calcularam-se diversos valores de COV em função de diferentes valores de PSI. Tendo em conta que o PSI varia entre 0 e 5, e que estes extremos são abordados apenas de uma forma teórica, foi testado um intervalo de valores entre 1 e 4.5, apresentando-se os resultados no quadro 4.1.

Uma vez que esta é uma análise específica deste trabalho, ou seja, no estudo em causa não foi abordada em pormenor a questão da variação do COV com a qualidade do pavimento, foi necessário adoptar um valor de PSI de referência. Deste modo, o valor adoptado foi de 3.5, pois, como se verá no ponto 4.4 deste capítulo, corresponde ao valor do PSI médio actual para a rede rodoviária nacional.

Quadro 4.1 - Variação do COV em relação ao PSI e respectivos Factores de Correção do modelo UC-UM

PSI/IQ [0-5]	COV [€/km/veículo]	Δ COV [%]	Factor de correção
1	0.367	10.4	1.104
1.5	0.356	7.0	1.070
2	0.347	4.3	1.043
2.5	0.340	2.3	1.023
3	0.335	0.9	1.009
3.5	0.332	0.0	1.000
4	0.331	-0.5	0.995
4.5	0.330	-0.7	0.993

Os resultados obtidos mostram que os custos de operação, ao serem testados em relação ao nível de qualidade do pavimento dado pelo PSI, são afectados com um acréscimo de cerca de 10% quando o pavimento apresenta um PSI de muito baixa qualidade, ou seja, PSI=1. Quando, pelo contrário, o pavimento apresenta um índice de qualidade superior ao valor médio, os custos de operação diminuem. Contudo, essa variação não é tão significativa. Para um PSI de 4.5, obtém-se uma diminuição do COV inferior a 1%.

Com estes dados pode-se constatar que existem muito mais inconvenientes, traduzidos por percentagens mais elevadas, quando os custos são agravados devido à má qualidade do pavimento, do que benefícios quando os custos são diminuídos devido ao bom estado deste.

A figura seguinte apresenta em gráfico a variação dos factores de correção do COV versus PSI para uma melhor percepção da relação estudada.

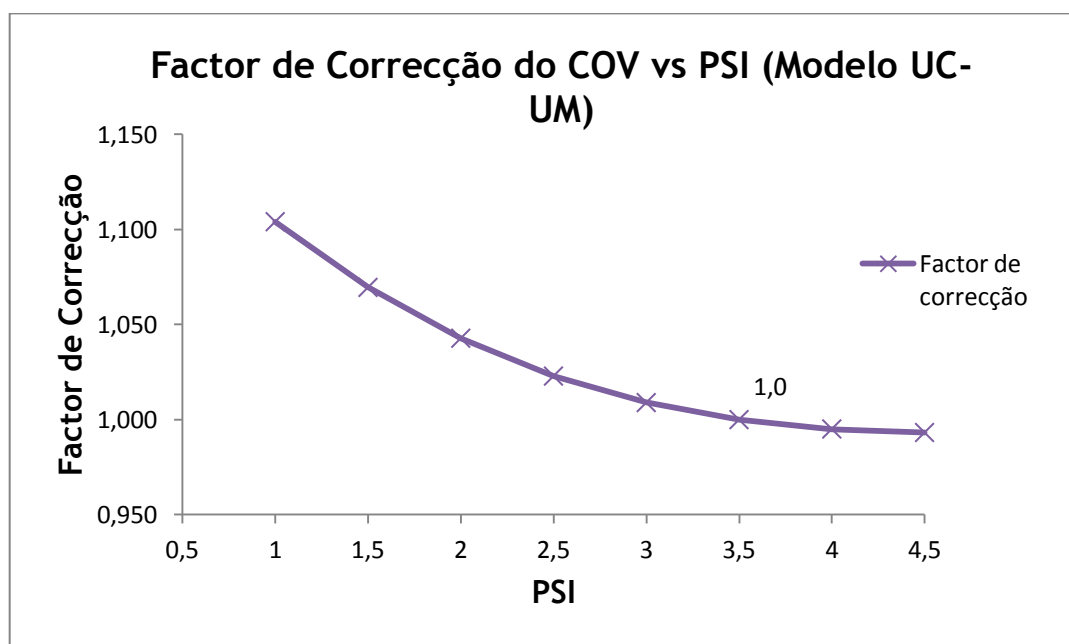


Figura 4.1 - Relação Factores de Correção do COV vs PSI do modelo UC-UM

### **Estudos do TRB e da ASTM**

A incorporação de dois estudos neste ponto está relacionada com o facto de estes estarem interligados e de se complementarem um ao outro.

No que concerne ao estudo da “American Society for Testing and Materials” (ASTM) (ASTM, 1983), resultou de um documento de investigação intitulado ““Vehicle Operating Costs Related to Operating Mode, Road Design, and Pavement Condition” (Zaniewski e Butler, 1983), elaborado entre 1979 e 1982, sendo posteriormente publicado pela ASTM.

Este estudo consistiu na actualização de quadros de custos de operação dos veículos e das suas componentes. As componentes dos custos de operação de veículos alvos de estudo foram a da manutenção e reparação, do consumo de óleo, de pneus e a da desvalorização, ou seja, as componentes “non fuel” dos custos de operação de veículos.

A abordagem utilizada neste estudo consistiu em identificar os consumos envolvidos para cada uma destas componentes e, em seguida, com o respectivo preço unitário, obter os custos de operação dos veículos. Deste modo, permitiu-se futuras actualizações dos quadros de custos de operação dos veículos, bastando para isso conhecer as variações dos preços. Este tipo de abordagem é bastante benéfica desde que o consumo das componentes varie com muito menos frequência que os preços unitários.

Os resultados deste estudo apresentaram um novo conjunto de quadros relacionando os custos de operação dos veículos com o índice de qualidade dos pavimentos e as características geométricas das estradas. Os quadros de consumo das componentes foram estabelecidos para velocidades constantes e para ciclos de variação da velocidade de operação.

O estudo revelou ainda que é difícil obter evidências directas da influência das características da estrada e do estado dos pavimentos sobre as componentes que não a do combustível (“non-fuel”) nos custos de operação dos veículos, uma vez que para se verificarem variações destas componentes é necessário considerar longos períodos de observação. Assim sendo, os dados utilizados neste estudo foram adquiridos a partir de experiências realizadas no Brasil entre 1975 e 1982, que deram lugar a uma análise de dados extensa, sendo esta patrocinada e supervisionada pelo Banco Mundial. Os dados obtidos foram então utilizados pelos autores do estudo para quantificar a influência do estado dos pavimentos sobre os custos de operação dos veículos.

Como já foi referido anteriormente, o óleo é uma componente de baixo impacto no total dos CUE e, por esta razão, não é considerada neste trabalho. Por conseguinte, também na análise que se está a realizar sobre este estudo se vai desprezar a componente do óleo, apesar de os autores apresentarem resultados para esta componente.

Paralelamente ao estudo anterior desenvolvido pela ASTM, um outro foi elaborado pelo “Transportation Research Board” (TRB) intitulado “Fuel consumption related to roadway characteristics (discussion and closure)” (Zaniewski, 1983). Este estudo complementou a discussão sobre alguns factores que afectam as componentes dos COV. Assim, se no primeiro estudo se analisaram as componentes “non fuel” dos COV, este restringiu-se apenas ao estudo da componente combustível, tendo também como finalidade preparar um conjunto actualizado de quadros de custos de operação dos veículos.

O objectivo deste estudo passou então pela investigação das inter-relações entre as características da estrada e consumo de combustível, exigindo a realização de um conjunto de experiências para investigar o efeito da curvatura, do grau e tipo de superfície do estado do pavimento no consumo de combustível. Estas experiências foram realizadas em 1980 e 1981, utilizando um conjunto de oito veículos, que variou de um pequeno carro ligeiro a um tractor com semi-reboque. Os testes foram realizados enquanto os veículos circulavam de várias formas: em marcha lenta, acelerando, desacelerando e circulando a uma velocidade constante.

Após estas experiências foi concebido e apresentado um novo conjunto de quadros de COV relacionados com o consumo de combustível.

Ao analisar todos os dados dos quadros foi concluído no estudo que o estado dos pavimentos não afectou de forma significativa o consumo de combustível na gama de PSI normalmente encontrado nas estradas dos Estados Unidos. Este facto resultou de testes em pavimentos betuminosos com um intervalo de valores de índice de qualidade do pavimento entre 1.8 e 4.2. Esta foi uma descoberta muito significativa na análise económica e energética de sistemas de transporte rodoviário.

Mediante os dados obtidos considerou-se na análise aqui executada que na gama de valores do índice de qualidade do pavimento entre 1 a 4.5, a componente do combustível apresenta um factor de correcção de 1, isto é, não apresenta variação ou esta é pouco significativa.

É de salientar ainda que os dados retirados do estudo são para dois tipos de veículos representativos, os veículos ligeiros de passageiros (VLP) e os veículos pesados de mercadorias (VPM), os quais representam, respectivamente, cerca de 90% e 10% dos veículos que circulam nas estradas portuguesas.

De seguida é apresentado um quadro que compila os resultados obtidos nos dois estudos americanos, relativos ao consumo das componentes em análise para diferentes condições do pavimento e quantificadas pelo índice global de qualidade PSI, e ainda dois gráficos (para os VLP e para os VPM) respeitantes a esses valores. O valor base de PSI, isto é, o PSI de

referência neste estudo é de 3.5. É a partir deste valor que se quantificam os factores de correcção nas componentes.

Quadro 4.2 - Factores de correcção do consumo das componentes dos COV em relação ao PSI/IQ (adaptado de ASTM, 1983 e de Zaniewski, 1983)

PSI/IQ	Combustível		Pneus		Manutenção e Reparação		Desvalorização (Uso)	
	Factor de correcção FCc		Factor de correcção FCp		Factor de correcção FCmr		Factor de correcção FCd	
	VLP	VPM	VLP	VPM	VLP	VPM	VLP	VPM
1	1.00	1.00	2.40	1.67	2.30	2.35	1.14	1.32
1.5	1.00	1.00	1.97	1.44	1.98	1.82	1.09	1.22
2	1.00	1.00	1.64	1.27	1.71	1.50	1.06	1.14
2.5	1.00	1.00	1.37	1.16	1.37	1.27	1.04	1.09
3	1.00	1.00	1.16	1.07	1.15	1.11	1.02	1.04
3.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	0.86	0.95	0.90	0.92	0.99	0.97
4.5	1.00	1.00	0.76	0.92	0.83	0.86	0.98	0.94

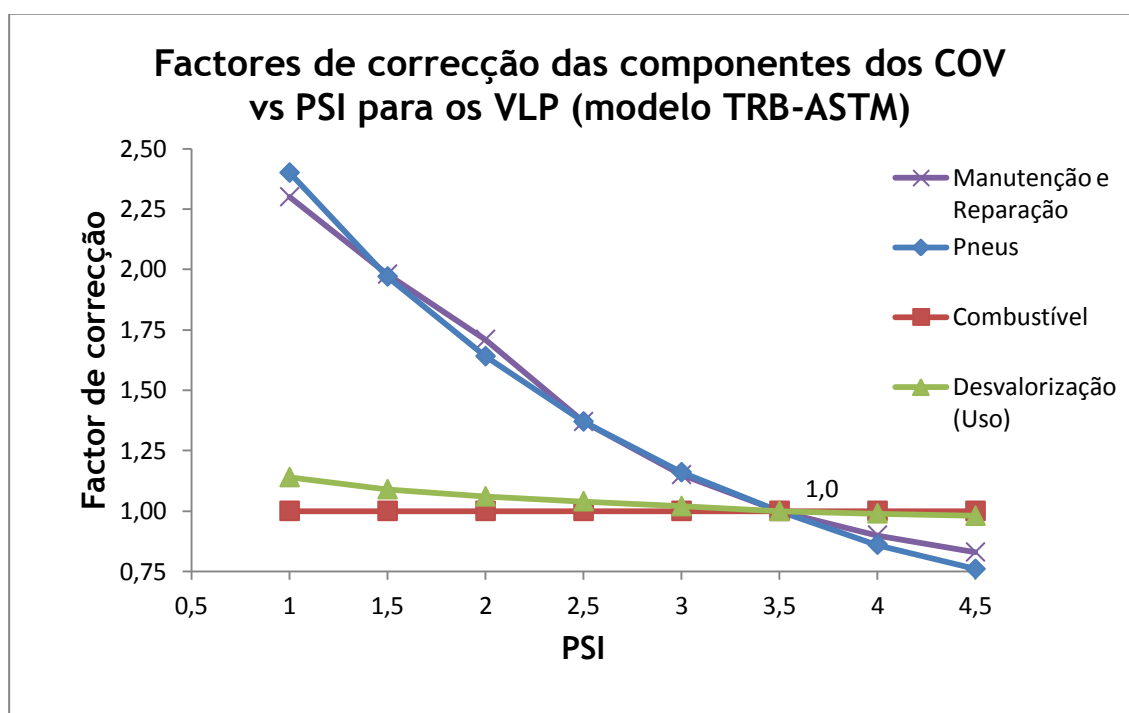


Figura 4.2 - Factores de correcção das componentes dos COV com o PSI do modelo TRB-ASTM, para VLP

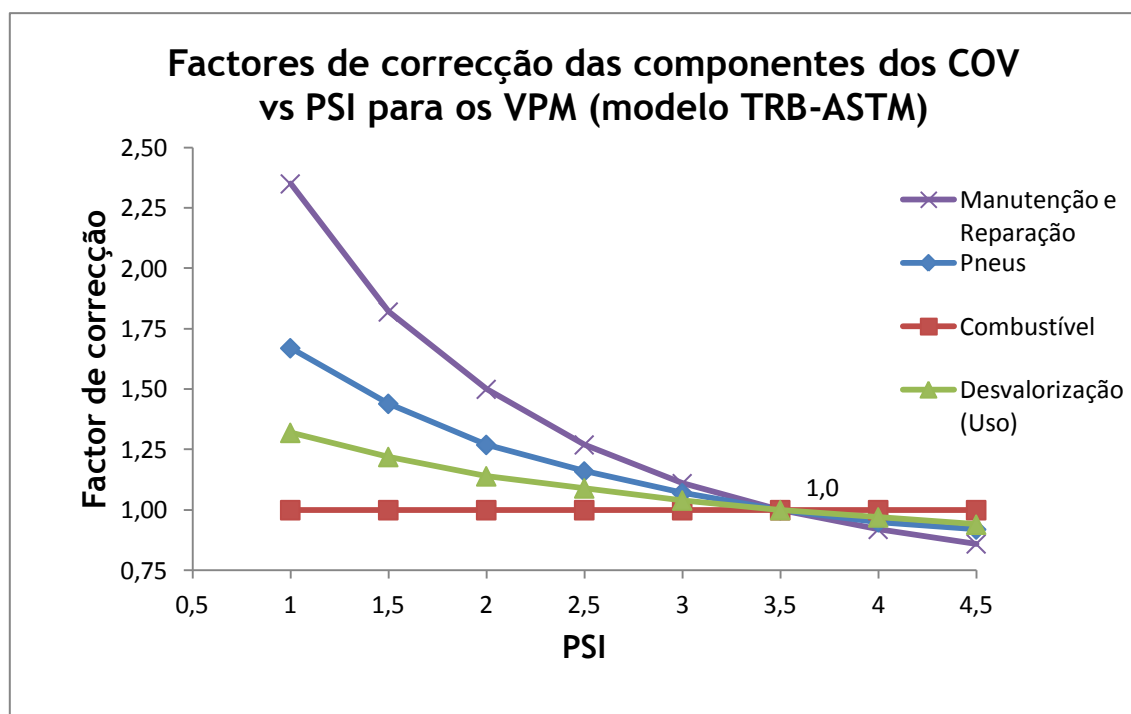


Figura 4.3 - Factores de correcção das componentes dos COV com o PSI do modelo TRB-ASTM, para VPM

Após análise do quadro 4.2 e das figuras 4.2 e 4.3 é possível tecer algumas considerações evidenciadas pelos valores apresentados para as componentes “non-fuel”, já que o combustível não sofre variação com o PSI. Pode-se dividir esta análise pelas duas classes de veículos representativos estudados: os VLP e os VPM.

Assim, para os VLP, a componente dos pneus e da manutenção e reparação são aquelas que apresentam um factor de correcção mais elevado quando o nível de qualidade do pavimento desce para um PSI de 1, chegando a atingir factores de correcção de 2,4 e 2,3 respectivamente. Contudo, como ficou bem patente no último ponto do capítulo anterior, a contribuição dos pneus e manutenção para o COV total é relativamente baixa, pelo que um factor de correcção elevado não se traduz, na maioria das vezes, em um aumento dos COV elevado. No que diz respeito aos VPM, a componente da manutenção e reparação é a que apresenta factores de correcção mais elevados com valores a atingir os 2,35. Os pneus estão um pouco abaixo situando-se o factor de correcção máximo em 1,67. A desvalorização é a componente que, em ambas as classes de veículos, mostra um valor do factor de correcção mais baixo, não excedendo os 1,14 nos VLP e 1,32 nos VPM.

Este estudo apresenta apenas valores de factores de correcção para as componentes dos COV em separado, não fazendo referência aos possíveis factores de correcção agregados do custo de operação final. Deste modo, a análise que se segue apresenta o cálculo do custo de operação final afectado pelos factores de correcção obtidos nas respectivas componentes e o estudo da sua variação com a mudança do índice de qualidade do pavimento. Com os dados fornecidos pelo quadro anterior e com dados obtidos do modelo português de CUE (Santos,

2007) exibidos no quadro 4.3 e relativos ao custo por componente, é possível fazer uma análise com o intuito de calcular os factores de correcção que afectam o custo de operação final.

Quadro 4.3 - Custo das componentes e respectiva percentagem nos COV para os VLP e VPM (adaptado de Santos, 2007)

		Combustível	Pneus	Manutenção e Reparação	Desvalorização	COV
VLP	Custo [€/km]	0.065	0.007	0.008	0.083	0.163
	% COV	39.9%	4.3%	4.9%	50.9%	100.0%
VPM	Custo [€/km]	0.466	0.027	0.026	0.0800	0.599
	% COV	77.8%	4.5%	4.3%	13.4%	100.0%

O custo de operação dos veículos em função de cada valor de PSI pode então ser obtido através da expressão 4.2, onde basicamente se faz o somatório da multiplicação do custo, retirado do modelo português de CUE, pelo factor de correcção, dado pelo quadro 4.2, das componentes dos COV envolvidas.

$$COV_{PSI} = Cc \times FC_{c,PSI} + Cp \times FC_{p,PSI} + Cmr \times FC_{mr,PSI} + Cd \times FC_{d,PSI}, \text{ [€/km]} \quad (4.2)$$

Onde:

$COV_{PSI}$  - é o custo de operação dos veículos para um determinado valor de PSI, em €/km;

$Cc$  - é o custo unitário do combustível, em €/km;

$FC_{c,PSI}$  - é o factor de correcção do combustível para um determinado valor de PSI;

$Cp$  - é o custo unitário dos pneus, em €/km;

$FC_{p,PSI}$  - é o factor de correcção dos pneus para um determinado valor de PSI;

$Cmr$  - é o custo unitário da manutenção e reparação, em €/km;

$FC_{mr,PSI}$  - é o factor de correcção da manutenção e reparação para um determinado valor de PSI;

$Cd$  - é o custo unitário da desvalorização, em €/km;

$FC_{d,PSI}$  - é o factor de correcção da desvalorização para um determinado valor de PSI.

A partir desta expressão foi possível construir o quadro 4.4 que sintetiza esta análise. Calculou-se o COV para cada valor de PSI, a variação deste custo e o respectivo factor de correcção para as duas classes de veículos estudadas.

Os resultados obtidos neste estudo são semelhantes aos obtidos no estudo anterior. Deste modo, quando o nível de qualidade do pavimento é baixo e se situa num PSI de valor 1, obtêm-se acréscimos de custos na ordem dos 20% para os VLP e 13% para os VPM, verificando-se uma maior influência do estado dos pavimentos nos custos de operação dos veículos ligeiros de passageiros. Como era de esperar, na outra extremidade de valores de PSI, com a elevada qualidade dos pavimentos obtêm-se factores de correcção mais baixos.

Quadro 4.4 - Variação do COV na rede rodoviária portuguesa em relação ao PSI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM obtidos por aplicação do modelo TRB-ASTM

PSI/IQ	VLP			VPM		
	COV [€/km]	Δ COV [%]	Factor de correcção	COV [€/km]	Δ COV [%]	Factor de correcção
1	0.195	19.5	1.195	0.678	13.2	1.132
1.5	0.185	13.6	1.136	0.650	8.5	1.085
2	0.178	9.3	1.093	0.630	5.3	1.053
2.5	0.172	5.4	1.054	0.618	3.1	1.031
3	0.167	2.4	1.024	0.607	1.3	1.013
3.5	0.163	0.0	1.000	0.599	0.0	1.000
4	0.160	-1.6	0.984	0.593	-1	0.990
4.5	0.158	-2.9	0.971	0.588	-1.8	0.982

A figura seguinte apresenta num gráfico a variação do PSI versus factor de correcção agregado do COV, para as duas classes de veículos estudadas.

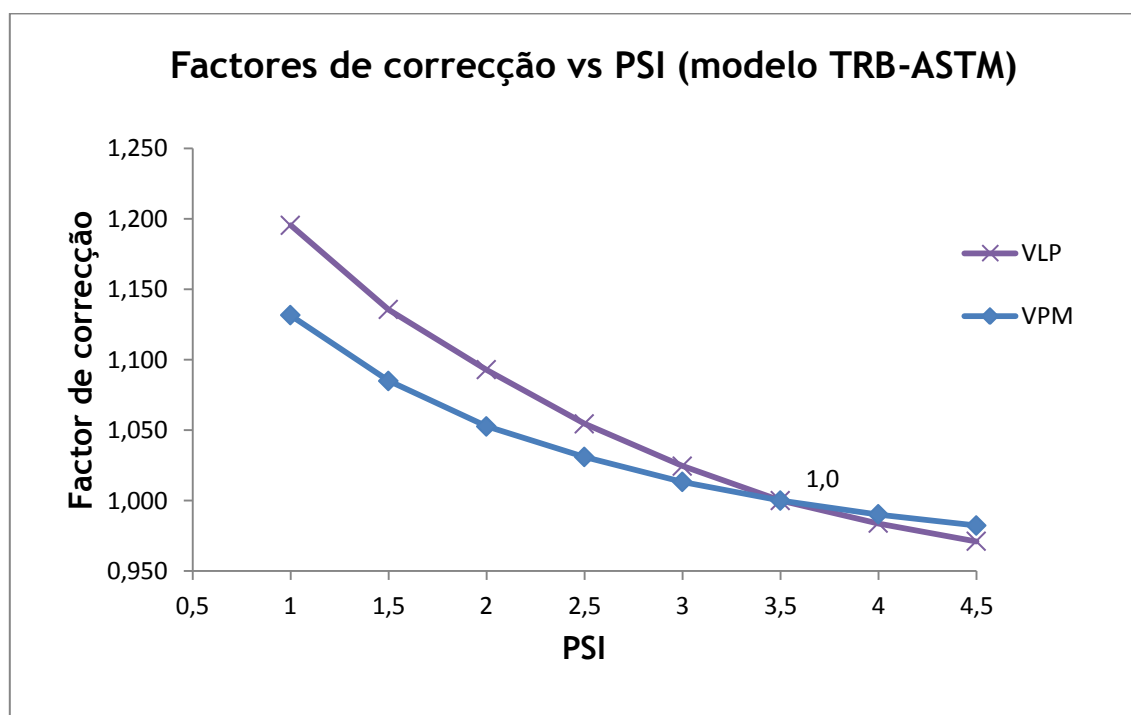


Figura 4.4 - Relação factores de correcção do COV vs PSI do modelo TRB-ASTM aplicado à rede rodoviária portuguesa

#### 4.2.2. Em função do IRI

Como se referiu anteriormente, o IRI é um parâmetro muito importante usado na avaliação do estado dos pavimentos rodoviários. Este parâmetro tem em geral um peso elevado numa avaliação global de pavimentos de redes nacionais, como a feita com o índice global PSI. Devido a esta circunstância existem estudos que analisam a variação dos custos obtidos em função do IRI.

Seguidamente são descritos três estudos elaborados por diferentes entidades que usam o IRI como parâmetro representativo na análise do efeito do estado dos pavimentos nos COV. O primeiro estudo é o modelo de custos desenvolvido para a JAE (Pereira e Miranda, 1999) e que não chegou a ser implementado, seguindo-se o estudo sobre as estradas da Tailândia (Wipulanusat e Herabat, 2007) e terminando no modelo de custos dos utentes do HDM-4 (World Bank, 2010).

#### **MC JAE - Modelo de Custos dos utentes da JAE**

O Modelo de custos dos utentes da JAE (GEPa, 1995) é de certa forma semelhante ao estudo já descrito do TRB-ASTM, uma vez que ambos apresentam relações de variação das componentes dos COV com o estado do pavimento. No entanto, o modelo da JAE difere na medida em que a variação é feita em relação ao IRI, ao contrário do estudo TRB-ASTM, que utiliza o PSI. O modelo permite assim avaliar o impacto do estado do pavimento nas componentes do COV através da consideração do IRI. As componentes consideradas neste modelo e que são sujeitas a variação são o combustível, os pneus, as reparações e a desvalorização.

Como já foi referido do ponto 2.2.6 deste documento, onde se faz uma breve descrição sobre a origem e modo de funcionamento deste modelo, os custos que o modelo permite calcular são função da irregularidade longitudinal do pavimento de uma determinada sub-secção rodoviária, sendo o cálculo realizado a partir da consideração da categoria do itinerário rodoviário e das características do tráfego.

No modelo de custos dos utentes da JAE a irregularidade de referência é dada por um IRI de 2.7 m/km. Com base neste valor, o modelo apresenta os factores de correcção para as diferentes componentes dos COV. O quadro 4.5 e o gráfico da figura 4.5 permitem observar a variação dos valores para as diferentes componentes de COV consideradas no modelo.

Quadro 4.5 - Variação dos custos das componentes dos COV em relação ao IRI no modelo MC JAE  
(adaptado de GEPa, 1995)

IRI [m/km]	Variação dos custos das componentes %			
	Combustível	Pneus	Reparações	Desvalorização
1.5	99.8	77.5	75	80
2	99.9	82	80	88
2.7	100	100	100	100
3	100.1	105	110	103
3.5	100.2	113.2	123.2	110
4	100.4	120	135	115
5	100.8	130	155	125
6	101.3	140	170	131
7	102	148	181	135
8	103	158.2	187.7	135

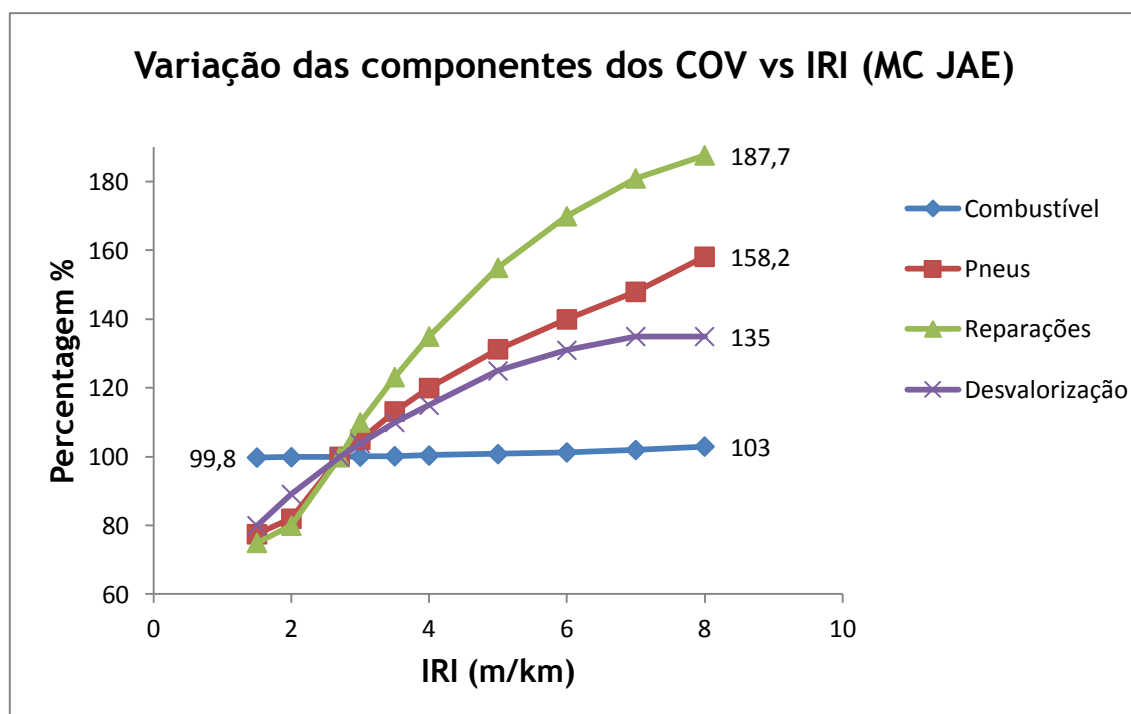


Figura 4.5 - Variação das componentes dos COV com o IRI no modelo de custos dos utentes da JAE

À semelhança do estudo do TRB-ASTM, é visível que as reparações, os pneus e a desvalorização, são significativamente afectados quando a qualidade do pavimento é baixa e, por consequência, o IRI é elevado. A parcela das reparações é a que apresenta factores de correcção mais elevados, atingindo valores da ordem dos 188% para um IRI de 8 m/km, e por isso, a mais sensível à irregularidade e consequentemente ao estado do pavimento. Os pneus e desvalorização apresentam também factores de correcção elevados para valores de IRI elevados, traduzidos por percentagens máximas de 158% e 135% respectivamente.

Um dado importante é que o combustível, tal como foi verificado em estudos anteriores, tem uma variação pouco significativa com a variação da qualidade do pavimento.

Como este modelo de custos, à semelhança do estudo desenvolvido pelo TRB-ASTM, não fornece factores de correcção do custo de operação dos veículos agregados, o método utilizado para obter esses mesmos factores de correcção é análogo ao adoptado na análise do estudo do TRB-ASTM. A análise que se fará consiste assim em calcular o custo de operação final obtido pela soma do custo de cada componente, cujos valores são afectados pelos factores de correcção dados pelo modelo, e examinar a sua variação com a mudança de qualidade do pavimento. Os factores de correcção das componentes são fornecidos pelo quadro 4.5 e os dados relativos aos custos das componentes pelo modelo português de CUE (quadro 4.3). Aplica-se então de novo a expressão 4.2, dividindo por 100 as percentagens apresentadas para obter os factores de correcção. No final obtêm-se os custos de operação agregados dos veículos, através dos quais se pode fazer a análise da sua variação com o estado do pavimento. O quadro 4.6 apresenta essa mesma análise.

Quadro 4.6 - Variação do COV na rede rodoviária portuguesa em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM obtidos por aplicação do modelo MC JAE

IRI [m/km]	VLP			VPM		
	COV [€/km]	Δ COV [%]	Factor de correcção	COV [€/km]	Δ COV [%]	Factor de correcção
1.5	0.143	-12.5	0.875	0.569	-4.9	0.951
2	0.151	-7.3	0.927	0.580	-3.2	0.968
2.7	0.163	0.0	1.000	0.599	0.0	1.000
3	0.167	2.7	1.027	0.607	1.3	1.013
3.5	0.174	6.9	1.069	0.618	3.1	1.031
4	0.180	10.4	1.104	0.627	4.7	1.047
5	0.191	17.1	1.171	0.645	7.8	1.078
6	0.198	21.5	1.215	0.659	10.0	1.100
7	0.203	24.7	1.247	0.670	11.9	1.119
8	0.205	25.8	1.258	0.679	13.4	1.134

Analisando os dados obtidos verifica-se que os factores de correcção do COV obtidos neste modelo são significativos, correspondendo a cerca de 26% de agravamento nos VLP e 13% nos VPM quando o IRI atinge os 8 m/km. Estes factores são, de certo modo, um pouco mais elevados que os obtidos na análise em relação ao PSI. Este facto pode estar relacionado com o intervalo de valores de IRI utilizado, podendo ultrapassar os valores tipicamente associados a valores de PSI baixos. Nesta análise utilizou-se uma escala que varia de 1.5 a 8m/km, fazendo assim com que os factores de correcção também sejam maiores.

O gráfico da figura 4.6 exibe o andamento das curvas da variação do factor de correcção dos COV agregados versus o IRI para o modelo de custos dos utentes da JAE.

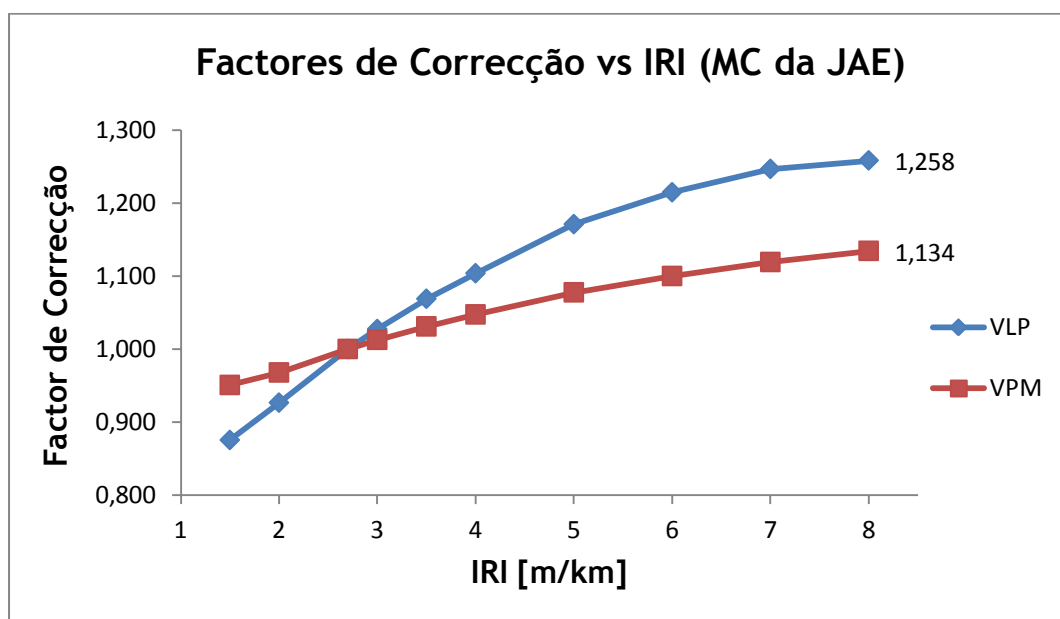


Figura 4.6 - Relação factores de correcção do COV vs IRI do MC JAE aplicado à rede rodoviária portuguesa

### **Estudo das Universidades de Walailak e North Dakota State**

O estudo que a seguir se aborda, foi desenvolvido pelas universidades de Walailak na Tailândia e de North Dakota State nos Estados Unidos da América (Wipulanusat e Herabat, 2007), tendo como principal objectivo a pesquisa de formas para melhorar a qualidade das estradas na Tailândia. Baseia-se num método denominado Método de Avaliação Contingencial (Contingent Valuation Method - CVM), que é usado para obter as preferências e opiniões dos utentes da estrada, sendo estas expressas em termos de disposição para pagar (Willingness to Pay - WTP) e disponibilidade para aceitar (Willingness to Accept - WTA) um determinado serviço. Deste modo foram realizados questionários aos utentes da estrada revelando que estes estão conscientes do problema da degradação da qualidade das estradas e mostrando também que os utentes estão dispostos a sacrificar parte dos seus recursos para melhorar a sua qualidade de vida.

O estudo foca assim a sua pesquisa no desenvolvimento de modelos de regressão que permitem estimar os benefícios decorrentes de acções de manutenção que aumentem a qualidade dos pavimentos da rede. Uma estimativa eficaz dos benefícios para o utente ajuda as entidades responsáveis a programar as actividades de manutenção adequadas no momento adequado.

Os modelos de regressão são desenvolvidos com base na estimativa de benefícios obtida através do WTP e WTA e no Índice de Irregularidade Internacional (IRI). No estudo, chegou-se à conclusão que os benefícios derivados do Método de Avaliação Contingencial são sensíveis aos custos dos utentes da estrada, comparando especialmente esses benefícios com o custo de operação dos veículos, sendo este tipo de custo estimado com base no IRI.

A ferramenta para estimar os custos do ciclo de vida em estradas na Tailândia é baseada na geometria da estrada e no “Maintenance Standards Model” (HDM-III), desenvolvido pelo Banco Mundial. O HDM-III contém um conjunto de relações que estimam as várias componentes do COV, como por exemplo o consumo de combustível, o desgaste dos pneus, a manutenção e desvalorização, em função da irregularidade da estrada, medida em termos do IRI. As expressões que se apresentam a seguir para dois tipos de classes de veículos representativos, os veículos ligeiros de passageiros e pesados de mercadorias, foram desenvolvidas para estimar o custo de operação adicional para os utentes quando existe variação da qualidade do pavimento, e por isso do IRI.

$$COV_{VLP} = 3.40 - 0.0707 \times IRI + 0.0232 \times IRI^2 \quad (4.3)$$

$$COV_{VPM} = 5.57 - 0.1543 \times IRI + 0.0411 \times IRI^2 \quad (4.4)$$

Onde:

$COV_{VLP}$  é o custo de operação dos veículos ligeiros de passageiros, em baht/veículo/km;

$COV_{VPM}$  - é o custo de operação dos veículos pesados de mercadorias, em baht/veículo/km;  
 IRI - é o índice de irregularidade internacional, em m/km.

Sobre estas expressões, há ainda a salientar que o custo de operação é apresentado em ordem à moeda tailandesa, ou seja, o baht. Como se pretende uma análise da variação do custo, este facto não interferirá na análise.

Utilizando as duas expressões acima foi possível calcular diversos valores de COV para diferentes valores de IRI e assim analisar a variação que ocorre entre estes dois parâmetros. O valor de referência considerado neste estudo foi, à semelhança do modelo da JAE, o IRI de 2.7 m/km. Esta análise é apresentada no quadro 4.7:

Quadro 4.7 - Variação do COV em relação ao IRI e respectivos factores de correcção para os VLP e VPM no modelo Tailandês

IRI [m/km]	VLP			VPM		
	COV [Baht/veic./km]	$\Delta$ COV [%]	Factor de correcção	COV [Baht/veic./km]	$\Delta$ COV [%]	Factor de correcção
1.5	3.346	-0.9	0.991	5.431	-0.4	0.996
2	3.351	-0.8	0.992	5.426	-0.5	0.995
2.7	3.378	0.0	1.000	5.453	0.0	1.000
3	3.397	0.5	1.005	5.477	0.4	1.004
3.5	3.437	1.7	1.017	5.533	1.5	1.015
4	3.488	3.3	1.033	5.610	2.9	1.029
5	3.627	7.3	1.073	5.826	6.8	1.068
6	3.811	12.8	1.128	6.124	12.3	1.123
7	4.042	19.6	1.196	6.504	19.3	1.193
8	4.319	27.9	1.279	6.966	27.7	1.277

Ao analisar os dados obtidos verifica-se que apesar de os VPM apresentarem, como era de esperar, COV mais elevados que os VLP, a ordem de grandeza da variação com o IRI é muito próxima nas duas classes de veículos. Assim sendo, quando se atinge um IRI elevado, como por exemplo de 8, obtêm-se factores de correcção na ordem do 1.3 para as duas classes de veículos. Comparando com os valores obtidos no modelo anterior da JAE, os factores de correcção são ligeiramente mais elevados para os VLP e significativamente maiores para os VPM.

O gráfico seguinte mostra, para o modelo apresentado, o andamento da curva de variação do factor de correcção do COV versus o IRI.

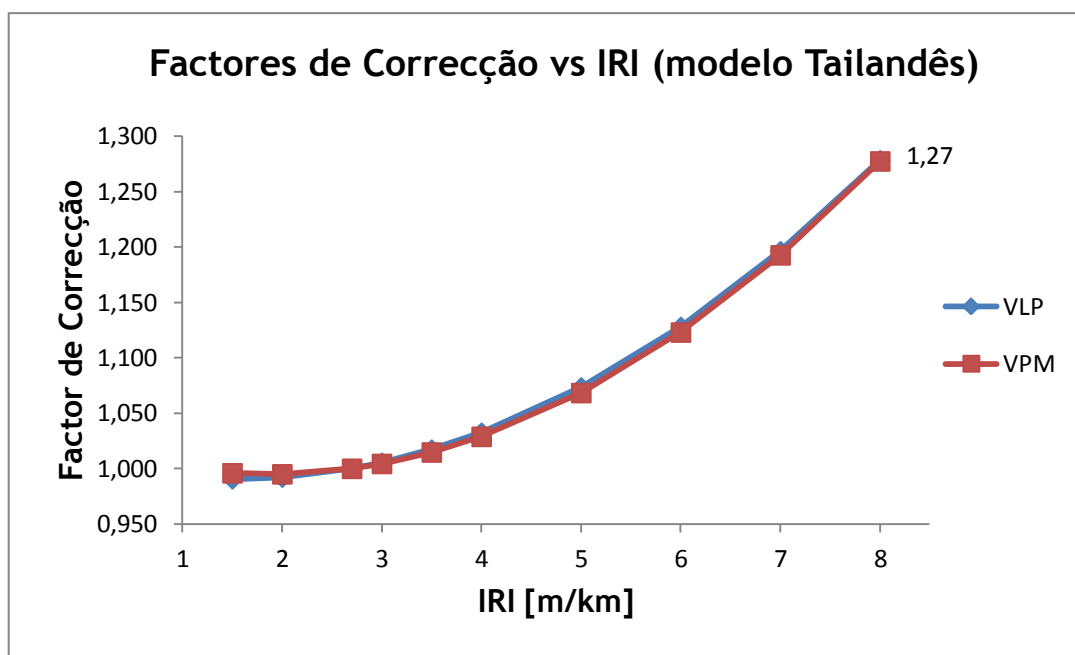


Figura 4.7 - Relação factores de correcção do COV vs IRI do modelo tailandês

#### **Modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4 - versão 2.00**

O modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4 é uma ferramenta de software desenvolvida pelo Banco Mundial (World Bank, 2010), de extrema utilidade no âmbito das análises e cálculo dos custos dos utentes. A versão 2.00 é a mais recente actualização deste software, datando de Fevereiro de 2010. Desde o lançamento da primeira versão deste modelo que o software tem sido utilizado em muitos países no âmbito de uma variada gama de projectos.

Mais amplo e rigoroso, o modelo do HDM-4 difere de todos os modelos referidos anteriormente. É um modelo que junta uma grande quantidade de informação, sendo esta inserida pelo utilizador antes de obter qualquer tipo de resultado. As folhas de cálculo onde se inserem os dados a analisar são os chamados “Inputs” ou folhas dos dados de entrada. Como se pode verificar na figura 4.8 que mostra o menu inicial do programa, o modelo conta ainda com uma coluna central (“Calculations”) onde é possível mandar executar os cálculos segundo quatro opções de avaliação, e uma coluna relativa aos resultados obtidos ou dados de saída (“Outputs”).

Para calcular os CUE, o modelo relaciona diversos aspectos, como a velocidade, os tempos de percurso, os custos de operação e as emissões de gases para a atmosfera.

Uma das vantagens mais importantes deste modelo é o seu carácter flexível, uma vez que inclui uma folha de cálculo onde é possível fazer a calibração do tipo de veículos a estudar e inserir informação respeitante às características da estrada e do tráfego, adaptando-se assim às várias características dos países.

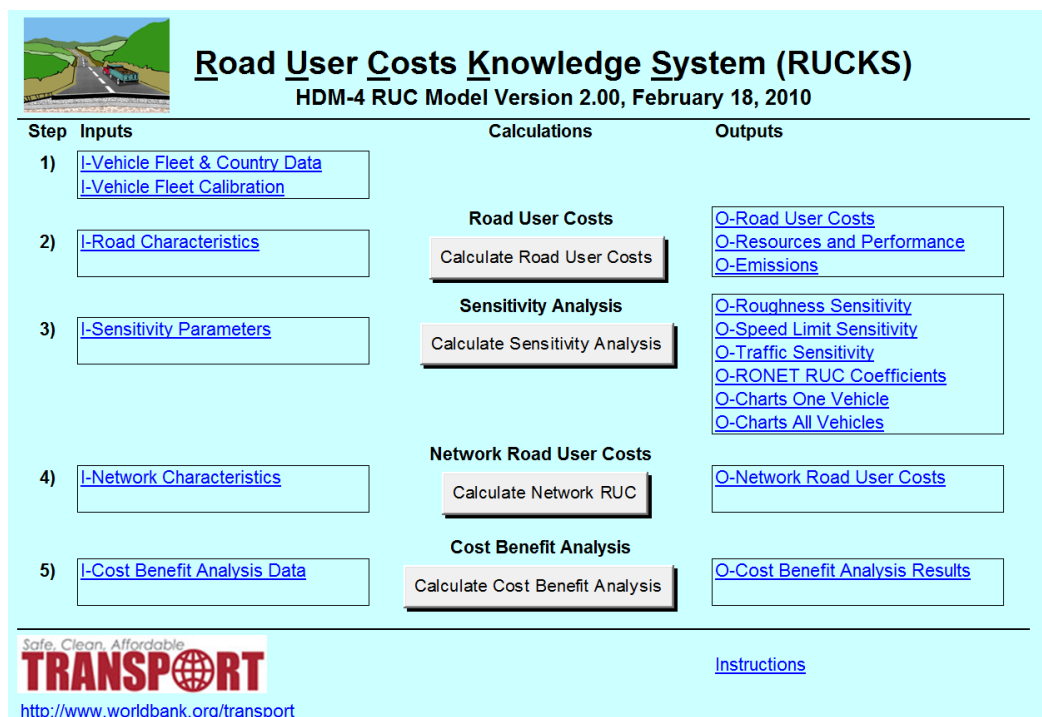


Figura 4.8 - Menu inicial do programa do modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4, versão 2.00 (World Bank, 2010)

As quatro opções de avaliação que o modelo apresenta são as seguintes:

- Cálculo dos Custos dos Utentes da Estrada - usado para calcular os custos dos utentes e das emissões de gases para um troço de estrada com 1 km de comprimento;
- Cálculo de Análises de Sensibilidade - usado para efectuar uma análise de sensibilidade dos custos em relação a 3 parâmetros: a irregularidade, o limite de velocidade e o tráfego;
- Cálculo dos Custos dos Utentes da Estrada para uma rede rodoviária - usado para calcular os custos dos utentes das estradas e as emissões de gases de uma rede rodoviária com troços de diferentes comprimentos, condições e características de tráfego;
- Cálculo de Análises Custo-Benefício - usado para realizar uma análise custo-benefício de um projecto considerando alternativas de projecto.

Como a principal questão abordada neste trabalho é o efeito do estado dos pavimentos nos custos, a opção de avaliação efectuada com o programa do modelo foi a do cálculo de uma análise de sensibilidade à irregularidade, sendo esta realizada tendo em conta duas classes de veículos, os VLP e VPM (no programa considerou-se “Car Medium” e “Truck Articulated”).

A análise ao cenário português foi iniciada introduzindo no modelo dados relativos às classes de veículos, tais como: custos unitários referentes à compra de um veículo novo, custos de pneus, combustível e trabalhos de manutenção; características básicas dos veículos como km anuais percorridos e número de passageiros; custos das emissões de gases (usaram-se os valores por defeito do modelo); e ainda custos relacionados com a segurança rodoviária. Posteriormente inseriram-se os dados relacionados com as características da estrada,

incluindo aspectos relacionados com o estado dos pavimentos, a geometria da estrada e o tráfego médio diário anual (TMDA). Nesta folha de cálculo, o modelo fornece também valores típicos, por defeito, que podem ser utilizados. Para finalizar a inserção dos dados de entrada, introduziram-se os parâmetros de sensibilidade, nomeadamente o valor mínimo e máximo da irregularidade longitudinal a considerar na análise de sensibilidade dos CUE à irregularidade. Para não diferir das análises efectuadas com os modelos anteriores, optou-se por um intervalo de IRI de 1.5 a 8 m/km.

A fase seguinte da análise consistiu em seleccionar a opção referente ao cálculo de análises de sensibilidade. A partir daqui o software efectua as operações de cálculo e é exibida uma mensagem para que o utilizador seleccione uma opção de saída de dados (“output”) para observar os resultados obtidos.

Uma das principais questões que se colocaram na aplicação deste modelo foi a de que, inserindo todo o conjunto de dados descritos, o programa fornece, como já foi referido, os resultados em termos da globalidade dos custos dos utentes. Visto que o âmbito deste trabalho se foca apenas na componente dos COV, a estratégia para testar apenas esta parcela dos custos dos utentes, passou por introduzir apenas os dados relacionados com os custos de operação no modelo, não considerando as restantes parcelas dos CUE. Deste modo, a análise de sensibilidade à irregularidade obtida no final diz apenas respeito aos COV.

Tendo em conta todos estes factores, decidiu-se testar o modelo em 4 situações distintas que permitem obter diferentes tipos de resultados, são elas:

- Resultados em termos de CUE a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito (Situação 1);
- Resultados em termos de CUE a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010 (Situação 2);
- Resultados em termos de COV a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito, considerando apenas as componentes de COV (Situação 3);
- Resultados em termos de COV a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010, considerando apenas as componentes dos COV (Situação 4).

Os quadros de introdução de dados no programa para as 4 situações podem ser consultados no anexo A deste documento.

Além da análise de sensibilidade à irregularidade, o programa fornece ainda dados onde é possível confirmar a importância dos COV no custo global. Assim, para uma irregularidade de 2m/km, as figuras de 4.9 a 4.12 apresentam gráficos que relacionam a magnitude de todas as componentes dos CUE para as situações 1 e 2. Nestas figuras é possível verificar o que cada componente contribui para custo global.

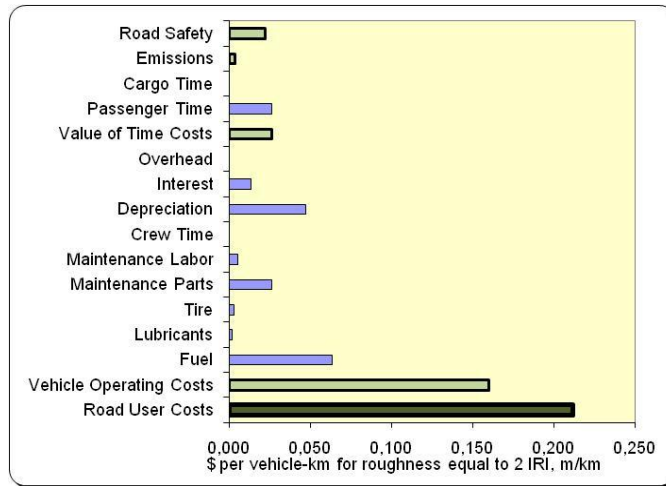


Figura 4.9 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VLP (Situação 1)

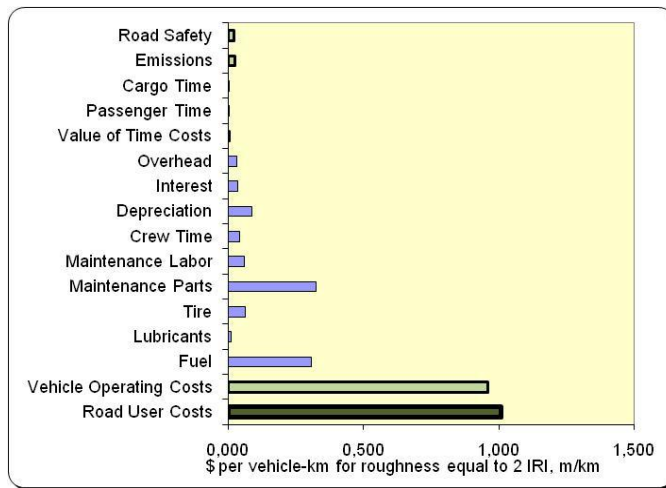


Figura 4.10 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VPM (Situação 1)

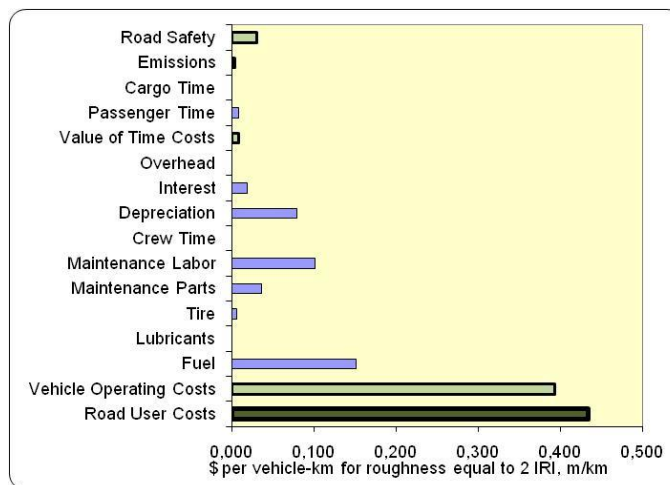


Figura 4.11 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VLP (Situação 2)

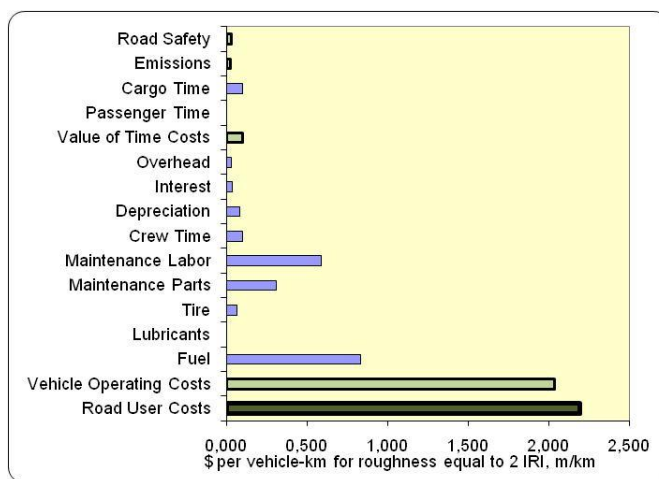


Figura 4.12 - Magnitude das parcelas dos CUE para uma irregularidade de 2m/km, para VPM (Situação 2)

Como se pode constatar pelas figuras obtidas do modelo, os COV (“Vehicle Operating Costs”) ocupam grande parte do total dos CUE, confirmando a sua extrema importância. Este facto verifica-se mais acentuadamente para os VPM, onde a diferença entre os COV e os CUE é mínima. Mesmo para o caso dos VLP, na situação 1, onde esta relação apresenta maior diferença, os COV atingem cerca de 75% dos CUE.

No que diz respeito à análise de sensibilidade à irregularidade propriamente dita, o programa fornece, para cada tipo de veículo, um conjunto de valores de relação custo vs irregularidade que são desenhados em gráficos com a mesma relação. Para estes pontos é depois determinada uma linha de tendência traduzida por uma equação polinomial de 3º grau. Os custos unitários dos utentes ou de operação, consoante a situação estudada, podem assim ser calculados para um determinado valor de IRI pela seguinte equação:

$$\text{Custo} = a_0 + a_1 \times \text{IRI} + a_2 \times \text{IRI}^2 + a_3 \times \text{IRI}^3, \left[ \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (4.5)$$

Onde:

$a_0, a_1, a_2, a_3$  são os coeficientes da equação polinomial que traduz a relação entre o IRI e o CUE ou COV (exibidos no quadro 4.8 para as situações consideradas).

Quadro 4.8 - Coeficientes polinomiais das equações das linhas de tendência obtidas pelo programa do HDM-4.

		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Situação 1	VLP	0,21029	0,00057	0,00006	0,00003
	VPM	1,00299	-0,01151	0,00791	-0,00043
Situação 2	VLP	0,42889	0,00178	0,00047	-0,00002
	VPM	2,15394	0,00384	0,00842	-0,00045
Situação 3	VLP	0,15799	0,00059	0,00019	-0,00001
	VPM	0,95620	-0,01478	0,00868	-0,00047
Situação 4	VLP	0,38746	0,00161	0,00054	-0,00003
	VPM	1,99414	0,00543	0,00865	-0,00060

Os gráficos obtidos pelo programa para as situações descritas são exibidos no anexo B deste documento.

Dando continuidade ao modo de análise e escala de IRI utilizada nos outros modelos, obtiveram-se os custos correspondentes às 4 situações consideradas e os respectivos parâmetros da variação de custo e factores de correcção. Os quadros 4.9 e 4.10 exibem esta análise.

Quadro 4.9 - Variação dos CUE em relação ao IRI e respectivos factores de correcção do CUE para os VLP e VPM nas situações 1 e 2 do modelo HDM-4

IRI [m/km]	Situação 1						Situação 2					
	VLP			VPM			VLP			VPM		
	CUE [\$/km]	Δ CUE [%]	F.C.	CUE [\$/km]	Δ CUE [%]	F.C.	CUE [€/km]	Δ CUE [%]	F.C.	CUE [€/km]	Δ CUE [%]	F.C.
1,5	0,211	-0.7	0,993	1,002	-1.9	0,981	0,433	-0.9	0,991	2,177	-1.8	0,982
2	0,212	-0.4	0,996	1,008	-1.3	0,987	0,434	-0.6	0,994	2,192	-1.1	0,989
2,7	0,213	0,0	1,000	1,021	0,0	1,000	0,437	0,0	1,000	2,217	0,0	1,000
3	0,213	0,2	1,002	1,028	0,7	1,007	0,438	0,3	1,003	2,229	0,6	1,006
3,5	0,214	0,7	1,007	1,041	2,0	1,020	0,440	0,7	1,007	2,251	1,6	1,016
4	0,215	1,2	1,012	1,056	3,4	1,034	0,442	1,2	1,012	2,275	2,6	1,026
5	0,218	2,6	1,026	1,090	6,7	1,067	0,447	2,3	1,023	2,328	5,0	1,050
6	0,222	4,4	1,044	1,127	10,3	1,103	0,452	3,4	1,034	2,383	7,5	1,075
7	0,227	6,7	1,067	1,164	14,0	1,140	0,457	4,6	1,046	2,440	10,0	1,100
8	0,234	9,7	1,097	1,199	17,4	1,174	0,462	5,8	1,058	2,494	12,5	1,125

Quadro 4.10 - Variação dos COV em relação ao IRI e respectivos factores de correcção do COV para os VLP e VPM nas situações 3 e 4 do modelo HDM-4

IRI [m/km]	Situação 3						SITUAÇÃO 4					
	VLP			VPM			VLP			VPM		
	COV [€/km]	Δ COV [%]	F.C.	COV [€/km]	Δ COV [%]	F.C.	COV [€/km]	Δ COV [%]	F.C.	COV [€/km]	Δ COV [%]	F.C.
1,5	0,159	-1.0	0,990	0,952	-1.9	0,981	0,391	-1.0	0,990	2,020	-2.0	0,980
2	0,160	-0.6	0,994	0,958	-1.3	0,987	0,393	-0.6	0,994	2,035	-1.2	0,988
2,7	0,161	0,0	1,000	0,970	0,0	1,000	0,395	0,0	1,000	2,060	0,0	1,000
3	0,161	0,3	1,003	0,977	0,7	1,007	0,396	0,3	1,003	2,072	0,6	1,006
3,5	0,162	0,8	1,008	0,991	2,1	1,021	0,398	0,8	1,008	2,093	1,6	1,016
4	0,163	1,3	1,013	1,006	3,7	1,037	0,400	1,3	1,013	2,116	2,7	1,027
5	0,165	2,5	1,025	1,040	7,2	1,072	0,405	2,5	1,025	2,163	5,0	1,050
6	0,167	3,8	1,038	1,078	11,1	1,111	0,409	3,6	1,036	2,209	7,2	1,072
7	0,169	5,1	1,051	1,116	15,0	1,150	0,414	4,7	1,047	2,251	9,3	1,093
8	0,171	6,6	1,066	1,152	18,7	1,187	0,418	5,7	1,057	2,285	10,9	1,109

Ao obter os quadros referentes aos factores de correcção foi possível construir o gráfico da figura 4.13 onde se pode ter uma melhor percepção do andamento da relações encontradas para as quatro situações estudadas.

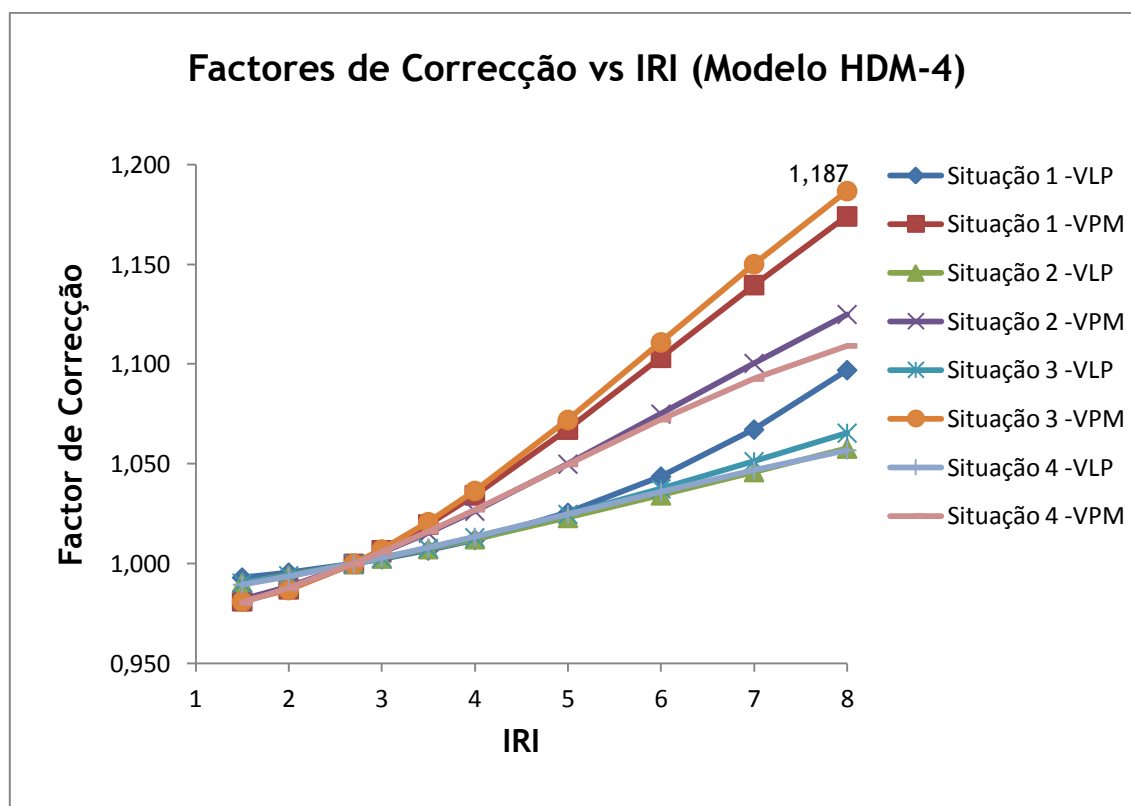


Figura 4.13 - Relação Factores de correcção vs IRI do modelo do HDM-4

Através da observação do gráfico pode-se verificar que, no modelo HDM-4, os VPM apresentam factores de correcção mais elevados que os VLP, verificando-se este facto em todas as situações estudadas. O factor de correcção mais elevado obtido para os VPM foi de cerca de 19% na situação 3, enquanto que para os VLP foi de aproximadamente 10% na situação 1.

Outro facto exibido na figura é o de que, para ambas as classes de veículos estudadas, ao se testar o modelo com os dados de entrada recomendados por defeito (situação 1 e 3), obtêm-se factores de correcção mais elevados em relação aos obtidos nas situações em que se introduziram os dados portugueses (2 e 4).

Há ainda a salientar o facto de as situações 2 e 4, calibradas com dados portugueses, apresentarem andamentos das curvas muito parecidos. No caso dos VLP esse andamento é mesmo muito semelhante. Como na situação 2, onde os dados são obtidos em termos do CUE, os COV são uma parcela muito significativa, o facto de se considerar apenas os COV na situação 4 não altera de forma significativa os resultados.

### 4.3. Avaliação comparativa das formulações existentes

Neste ponto do trabalho pretende-se estudar os modelos anteriormente descritos e testados de uma forma agregada, isto é, fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos em cada modelo no ponto anterior. Esta análise será, à semelhança do efectuado aquando da descrição dos modelos, dividida pelos modelos que utilizam o PSI e o IRI.

Iniciando esta análise pelos modelos que utilizam o PSI, foi possível construir o gráfico da figura 4.14.

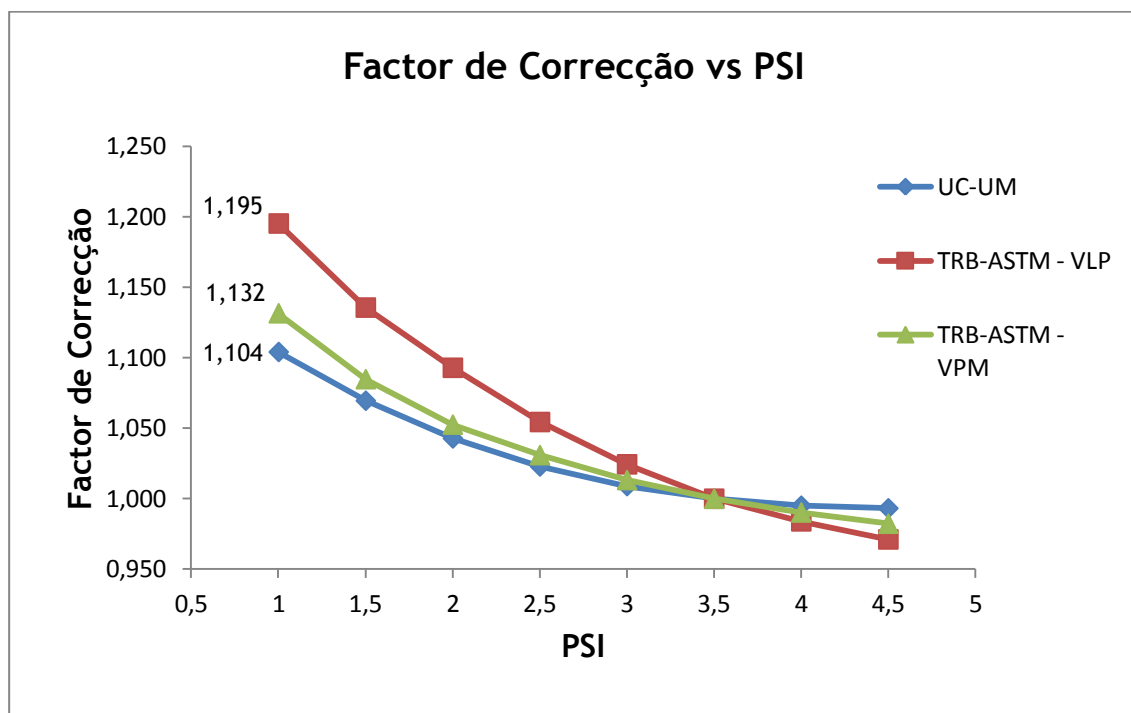


Figura 4.14 - Relação factores de correcção do COV vs PSI dos modelos estudados

O modelo do TRB- ASTM testado em relação ao VLP foi o que apresentou factores de correcção mais elevados atingindo quase os 20%. Já o modelo UC-UM apresenta factores de correcção um pouco menores, situando-se em cerca de 10%. Este é um modelo agregado, ou seja, agrega as diferentes classes de veículos no mesmo modelo.

Seguidamente efectuou-se uma análise para obter os resultados do estudo do TRB-ASTM para o tráfego agregado. Para isso foi necessário conhecer o valor da repartição típica das classes de veículos na corrente do tráfego, para o cenário português. Assim, considerando o tráfego da rede rodoviária portuguesa, considerou-se uma repartição de 90% para os VLP e de 10% para os VPM. Deste modo o COV agregado é dado pela seguinte expressão:

$$COV_{agregado} = 0,9 \times COV_{VLP} + 0,1 \times COV_{VPM}, \left[ \frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (4.6)$$

O quadro 4.11 e o gráfico da figura 4.15 apresentam o cálculo do custo agregado para o estudo do TRB-ASTM e a respectiva obtenção dos factores de correcção associados.

Quadro 4.11 - Variação dos COV em relação ao PSI e respectivos factores de correcção para os modelos agregados estudados

PSI/IQ [0-5]	UC-UM <sub>agregado</sub>	TRB-ASTM <sub>agregado</sub>			
	Factor de Correção	COV <sub>VLP</sub> [€/km]	COV <sub>VPM</sub> [€/km]	COV <sub>agregado</sub> [€/km]	Factor de Correção
1	1,104	0,195	0,678	0,243	1,177
1,5	1,070	0,185	0,650	0,232	1,121
2	1,043	0,178	0,630	0,223	1,081
2,5	1,023	0,172	0,618	0,216	1,048
3	1,009	0,167	0,607	0,211	1,021
3,5	1,000	0,163	0,599	0,207	1,000
4	0,995	0,160	0,593	0,204	0,986
4,5	0,993	0,158	0,588	0,201	0,974

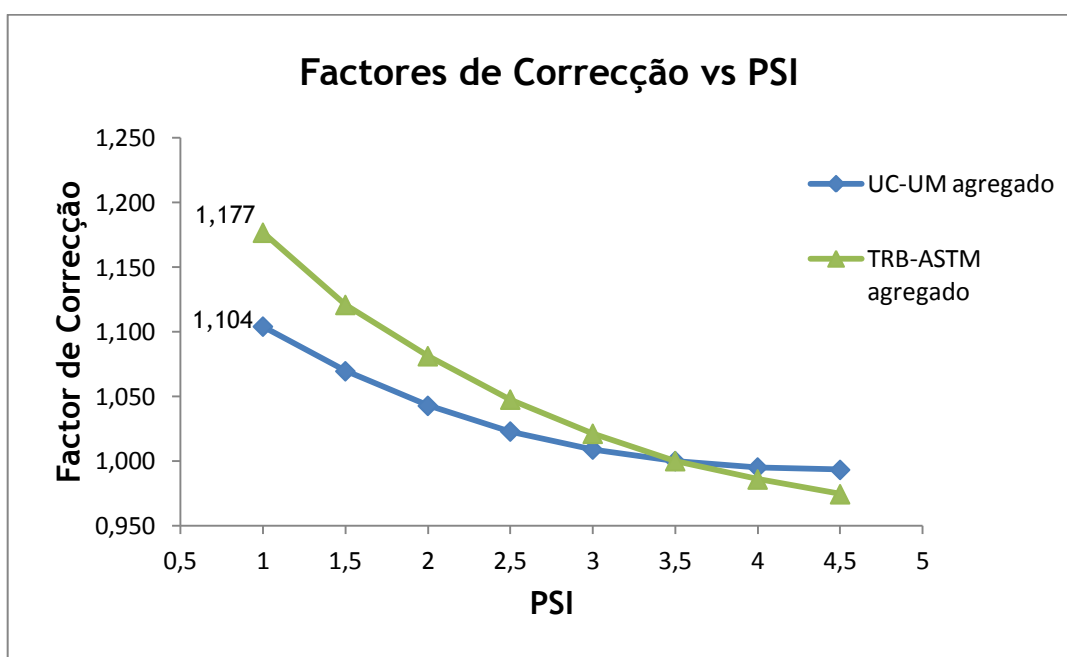


Figura 4.15 - Factores de Correção do COV vs PSI dos modelos agregados estudados

Comparando os dois modelos agregados verifica-se que no estudo do TRB-ASTM se obtêm factores de correcção mais elevados quando a qualidade do pavimento apresenta um PSI de 1. Neste estudo, como os VLP têm um maior peso, os valores agregados obtidos aproximam-se mais dos valores dos VLP, situando-se em acréscimos de custo na ordem dos 18%.

No que concerne aos modelos que utilizam o IRI para obter o efeito do estado dos pavimentos, obteve-se o conjunto de resultados ilustrado no gráfico da figura 4.16, onde figuram os casos de estudo abordados anteriormente.

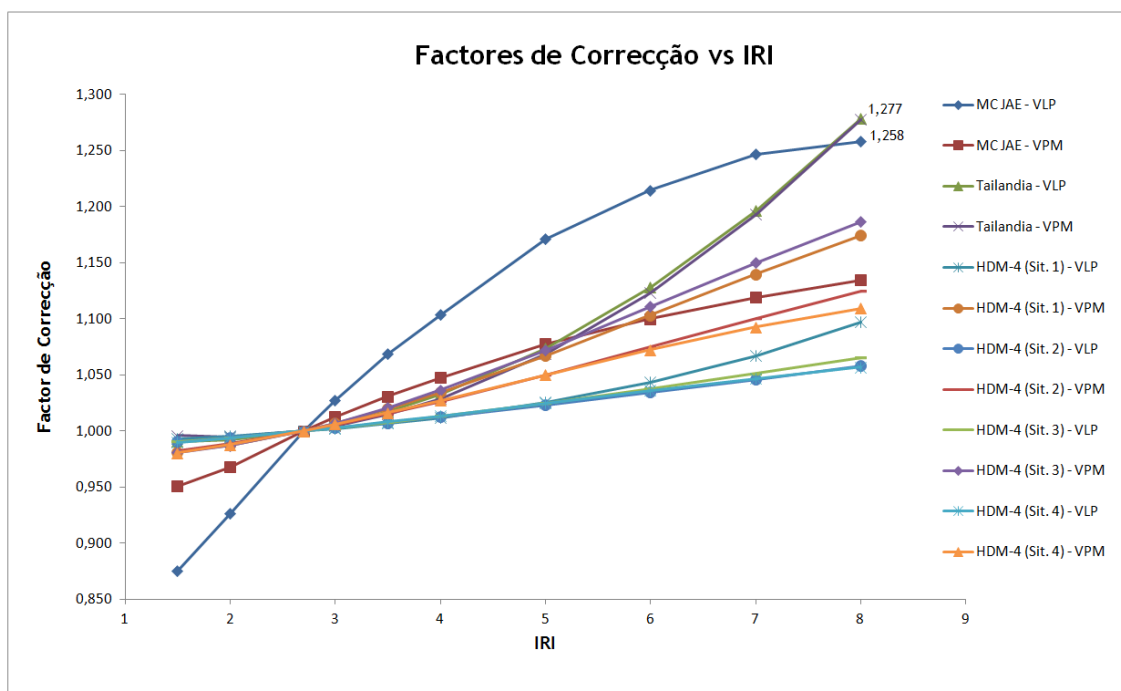


Figura 4.16 - Relação factores de correcção vs IRI para os modelos estudados

Pelo gráfico da figura verifica-se que o modelo da Tailândia é aquele em que se obtêm factores de correcção mais elevados, tanto para os VLP como para os VPM, já que as curvas obtidas são semelhantes para as duas classes. Foram assim atingidos custos adicionais na ordem dos 28%. Logo de seguida encontra-se o modelo de custos da JAE para os VLP, onde resultaram acréscimos de cerca de 26%.

Devido à elevada quantidade de casos de estudo analisados optou-se por dividir, numa primeira fase, as relações factores de correcção vs IRI pelas respectivas classes de veículos estudadas: os VLP e VPM. Deste modo, estas classes de veículos são abordadas separadamente através dos gráficos das figuras 4.17 e 4.18.

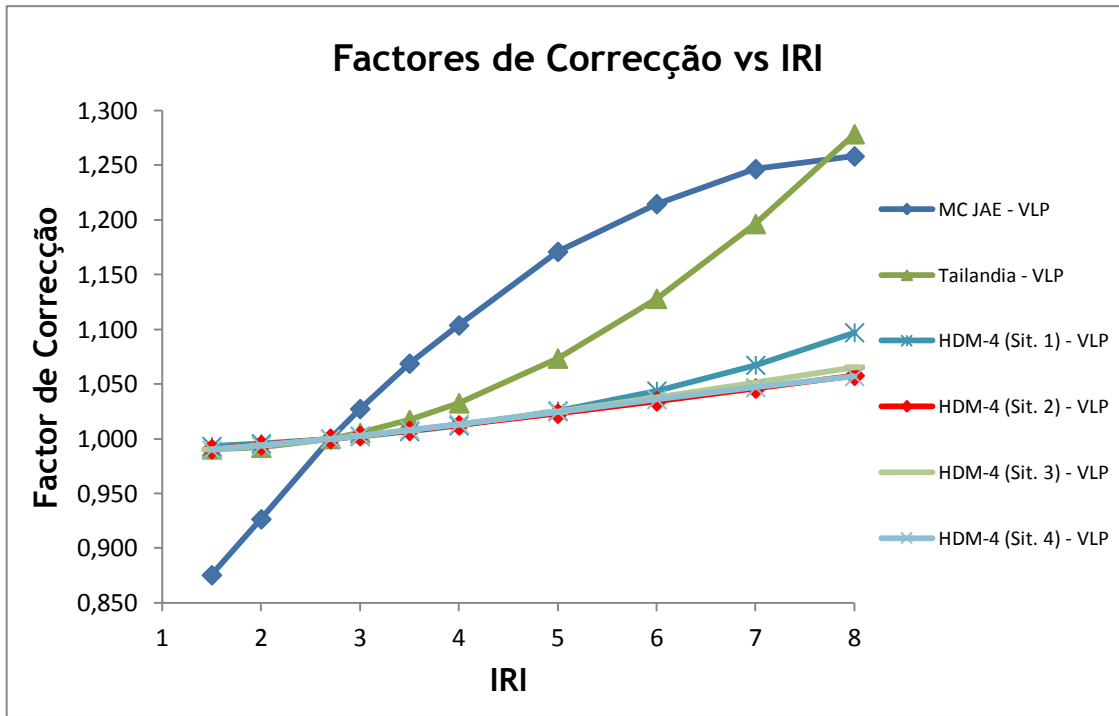


Figura 4.17 - Relação factores de correcção do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os VLP nos modelos estudados

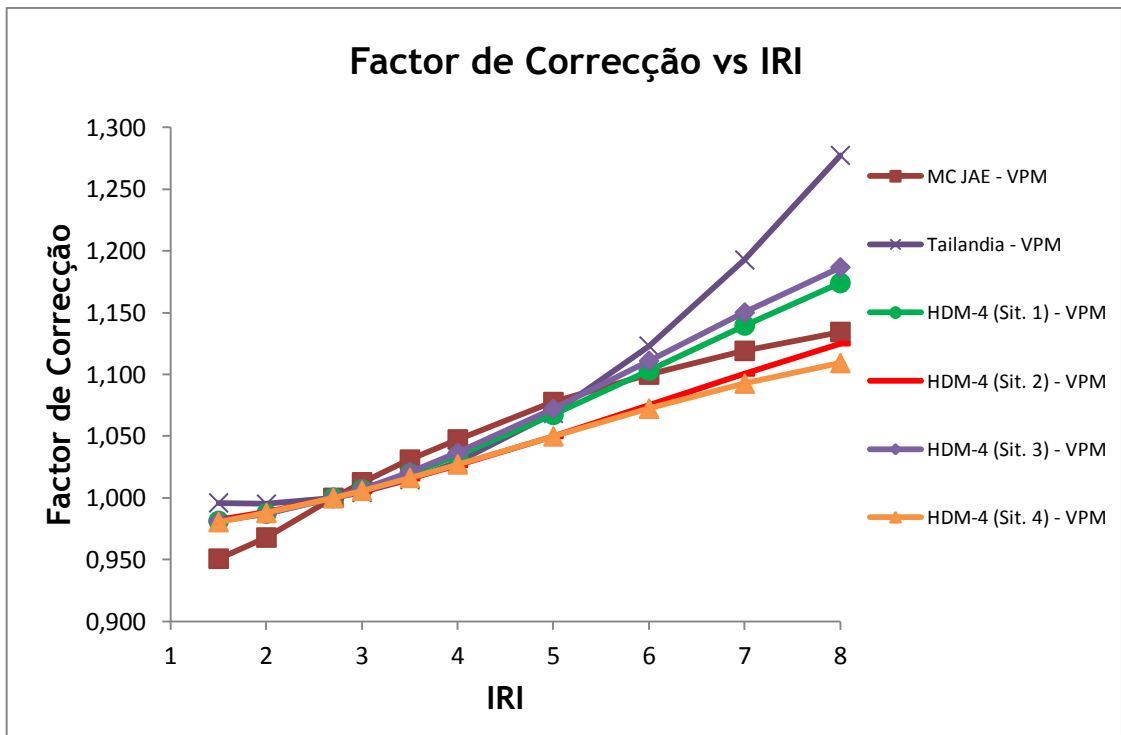


Figura 4.18 - Relação factores de correcção do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os VPM nos modelos estudados

Começando a análise dos resultados pelos VLP, percebe-se que das situações estudadas no modelo do HDM-4 resultam custos adicionais menores variando num intervalo de 6% para as situações 2 e 4 (dados de entrada portugueses no modelo) e 10% na situação 1 (com valores

por defeito). Os restantes modelos (da JAE e da Tailândia) apresentam, como foi referido anteriormente, factores mais elevados. extremamente elevados atingindo para certas situações consideradas no HDM-4 o quádruplo dos valores obtidos.

Nos VPM as curvas de variação são mais homogéneas que as dos VLP. Apenas o modelo tailandês apresenta factores de correcção mais elevados quando o IRI atinge os 8m/km. Nos restantes casos, para o mesmo valor de IRI os modelos variam num intervalo entre os 11% e os 19% de custo adicional, correspondendo às situações 4 e 3 do HDM-4. Quando o IRI é de cerca de 3.5m/km verifica-se que as curvas dos modelos se encontram mais agrupadas, com factores de correcção muito mais baixos, variando o custo adicional entre os 1.5% e os 3%.

A avaliação comparativa seguinte consiste em efectuar uma análise destes modelos considerando o tráfego agregado tal como no procedimento executado anteriormente com o estudo do TRB-ASTM, em relação ao PSI. Utilizando os mesmos valores para a repartição das classes de veículos e a expressão 4.6 calcularam-se os COV agregados para cada caso de estudo, sendo apresentados nos quadros 4.12 e 4.13.

Quadro 4.12 - Cálculo dos COV e CUE (HDM-4 Situação 1) agregados em relação ao IRI para os modelos MC-JAE, Tailandês e situação 1 do HDM-4

IRI [m/km]	MC-JAE <sub>agreg.</sub>			Tailândia <sub>agreg.</sub>			HDM-4 (Sit. 1) <sub>agreg.</sub>		
	COV <sub>VLP</sub> [€/km]	COV <sub>VPM</sub> [€/km]	COV <sub>agreg.</sub> [€/km]	COV <sub>VLP</sub> [Baht/ve ic./km]	COV <sub>VPM</sub> [Baht/ve ic./km]	COV <sub>agreg.</sub> [Baht/ve ic./km]	CUE <sub>VLP</sub> [\$/km]	CUE <sub>VPM</sub> [\$/km]	CUE <sub>agreg.</sub> [€/km]
1,5	0,143	0,569	0,185	3,346	5,431	3,555	0,211	1,002	0,290
2	0,151	0,580	0,194	3,351	5,426	3,559	0,212	1,008	0,292
2,7	0,163	0,599	0,207	3,378	5,453	3,586	0,213	1,021	0,294
3	0,167	0,607	0,211	3,397	5,477	3,605	0,213	1,028	0,295
3,5	0,174	0,618	0,219	3,437	5,533	3,646	0,214	1,041	0,297
4	0,180	0,627	0,225	3,488	5,610	3,701	0,215	1,056	0,299
5	0,191	0,645	0,236	3,627	5,826	3,846	0,218	1,090	0,305
6	0,198	0,659	0,244	3,811	6,124	4,042	0,222	1,127	0,313
7	0,203	0,670	0,250	4,042	6,504	4,288	0,227	1,164	0,321
8	0,205	0,679	0,253	4,319	6,966	4,584	0,234	1,199	0,330

Quadro 4.13 - Cálculo dos COV e CUE (HDM-4 Situação 2) agregado em relação ao IRI para as situações 2, 3 e 4 do modelo HDM-4

IRI [m/km]	HDM-4 (Sit. 2) <sub>agreg.</sub>			HDM-4 (Sit. 3) <sub>agreg.</sub>			HDM-4 (Sit. 4) <sub>agreg.</sub>		
	CUE <sub>VLP</sub> [€/km]	CUE <sub>VPM</sub> [€/km]	CUE <sub>agreg.</sub> [€/km]	COV <sub>VLP</sub> [\$/km]	COV <sub>VPM</sub> [\$/km]	COV <sub>agreg.</sub> [€/km]	COV <sub>VLP</sub> [€/km]	COV <sub>VPM</sub> [€/km]	COV <sub>agreg.</sub> [€/km]
1,5	0,433	2,177	0,607	0,159	0,952	0,239	0,391	2,020	0,554
2	0,434	2,192	0,610	0,160	0,958	0,240	0,393	2,035	0,557
2,7	0,437	2,217	0,615	0,161	0,970	0,242	0,395	2,060	0,562
3	0,438	2,229	0,617	0,161	0,977	0,243	0,396	2,072	0,564
3,5	0,440	2,251	0,621	0,162	0,991	0,245	0,398	2,093	0,568
4	0,442	2,275	0,625	0,163	1,006	0,247	0,400	2,116	0,572
5	0,447	2,328	0,635	0,165	1,040	0,252	0,405	2,163	0,581
6	0,452	2,383	0,645	0,167	1,078	0,258	0,409	2,209	0,589
7	0,457	2,440	0,655	0,169	1,116	0,264	0,414	2,251	0,597
8	0,462	2,494	0,665	0,171	1,152	0,269	0,418	2,285	0,604

A partir da obtenção dos COV agregados calculam-se os respectivos factores de correcção apresentados no quadro 4.14 e representados no gráfico da figura 4.19.

Quadro 4.14 - Factores de correcção dos COV e CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) em relação ao IRI dos modelos agregados estudados

IRI [m/km]	MC-JAE <sub>agreg.</sub>	Tailandia <sub>agreg.</sub>	HDM-4 (Sit. 1) <sub>agreg.</sub>	HDM-4 (Sit. 2) <sub>agreg.</sub>	HDM-4 (Sit. 3) <sub>agreg.</sub>	HDM-4 (Sit. 4) <sub>agreg.</sub>
1,5	0,897	0,991	0,989	0,987	0,987	0,986
2	0,939	0,993	0,993	0,992	0,991	0,991
2,7	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3	1,023	1,005	1,004	1,004	1,005	1,004
3,5	1,058	1,017	1,011	1,010	1,013	1,011
4	1,087	1,032	1,020	1,017	1,023	1,018
5	1,144	1,073	1,040	1,033	1,044	1,034
6	1,181	1,127	1,064	1,049	1,067	1,049
7	1,210	1,196	1,092	1,066	1,091	1,064
8	1,222	1,278	1,124	1,082	1,114	1,076

Pelo facto de os VLP representarem cerca de 90% da repartição do tráfego no cenário português, as formas das curvas obtidas dos modelos agregados aproximam-se mais à forma das curvas obtidas para os VLP. Desta forma o gráfico da figura anterior e sua interpretação é semelhante à do da figura 4.17.

O modelo Tailandês agregado permaneceu quase inalterado, uma vez que as curvas para ambas as classes de veículos eram semelhantes. No modelo de custos da JAE a forma da curva permaneceu a relativa aos VLP. No entanto, o factor de correcção obtido para um IRI de 8 m/km baixou fruto dos factores de correcção dos VPM serem menores. No que diz respeito às

aplicações do modelo do HDM é possível observar uma divisão dos modelos que utilizaram dados de entrada por defeito (situação 1 e 3) e os que se utilizaram dados portugueses (situação 2 e 4), apresentando os primeiros factores de correcção um pouco mais elevados.

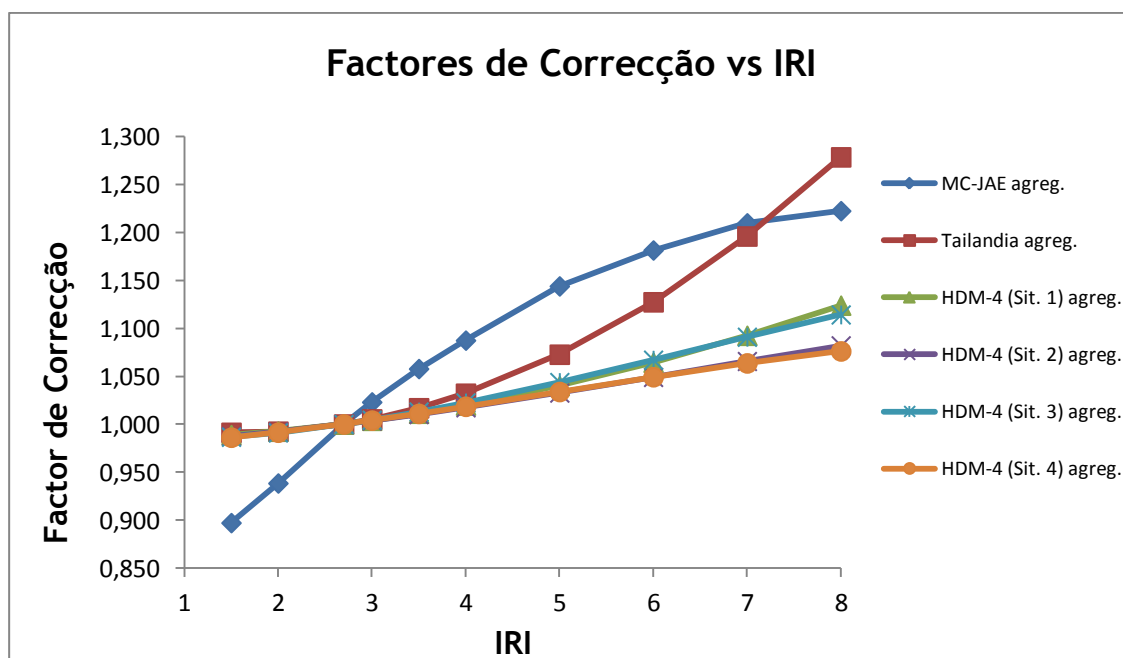


Figura 4.19 - Factores de correcção agregados do COV/CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI dos modelos estudados

#### 4.4. Validação da Proposta de Formulação para a Rede Rodoviária Portuguesa

Após a análise comparativa dos diversos modelos testados, pretende-se neste ponto que os conteúdos abordados e conclusões obtidas até aqui se possam tornar úteis no que a uma análise futura sobre os custos dos utentes de uma estrada diz respeito. Mais concretamente, pretende-se neste ponto descrever e validar uma proposta de formulação para considerar o efeito do estado dos pavimentos na determinação dos custos de operação dos veículos calculados pelo modelo português de CUE. Esta proposta de formulação foi realizada por um grupo de investigadores portugueses em 2010 (Santos et al, 2010), tendo surgido a partir do estudo preliminar de alguns dos modelos abordados neste documento. A necessidade de sustentar de forma mais robusta as decisões inicialmente tomadas justificou o desenvolvimento desta dissertação.

A proposta consistiu em, a partir da definição de um conjunto de cenários possíveis e relevantes a respeito do estado dos pavimentos de uma rede (pavimento em mau estado, estado dos pavimentos que justificam intervenção, estado dos pavimentos de referência e pavimentos em bom estado), e dos respectivos valores de PSI, IRI e factores de correcção do COV, encontrar uma formulação, traduzida por uma linha de tendência, que permita determinar um factor de correcção dos COV para qualquer situação do estado dos pavimentos

da rede nacional, traduzido este estado pelo índice PSI. Trata-se de uma proposta de formulação a aplicar ao conjunto das classes de veículos que fazem parte da corrente de tráfego (tráfego agregado).

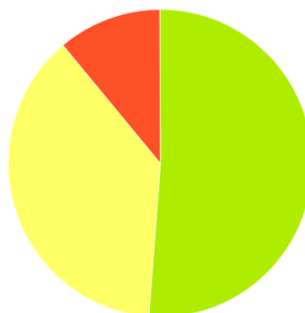
O primeiro cenário a ser abordado é o da situação de referência, ou seja, o que traduz a média da qualidade dos pavimentos que a rede rodoviária nacional apresentava à data dos últimos dados recolhidos e usados na determinação do PSI (dados recolhidos nos anos de 2007 e 2008). Deste modo, o valor de referência do índice de qualidade PSI dos pavimentos da rede nacional foi obtido a partir dos resultados encontrados no âmbito do Sistema de Gestão de Pavimentos da EP, SA - Estradas de Portugal.

O quadro 4.15 mostra os valores obtidos a partir do diagnóstico efectuado à rede rodoviária portuguesa (Trindade e Horta, 2009), correspondendo o índice de qualidade médio dos pavimentos da rede, ou PSI médio, a 3.27, que na escala de valores apresentada no quadro 3.5 da página 45 deste documento corresponde a “Bom”. Para facilitar a questão da numeração adoptou-se o valor de 3.5 para o valor de referência do índice de qualidade PSI. Como se pode verificar pelo quadro 3.6 da página 51, um PSI de 3.5, corresponde normalmente a um IRI de 2m/km, por outro lado, a avaliação qualitativa da irregularidade da rede nacional efectuada para o cálculo do PSI apontou para valores desta ordem.

Como o modelo de CUE que permitiu obter valores médios de COV para a rede rodoviária nacional, foi desenvolvido sensivelmente no mesmo período de tempo (refere-se a custos de 2006), foi possível associar ao cenário um valor de COV de referência. Esta é assim a situação de referência da proposta formulada, a que corresponde um factor de correcção igual 1.

Quadro 4.15 - Determinação do Índice de Qualidade da rede rodoviária (dados obtidos em 2007 e 2008) (Trindade e Horta, 2009)

	Extensão	Extensão Campanha		Qualidade média (IQ=PSI)	Qualidade					
		km	%		Bom		Razoável		Mediocre	
					km	%	km	%	km	%
Rede R. Nacional	11559	10953	95	3,27	5585	51	4149	38	1219	11
Rede R. Nacional Entregue	1070	1060	99	2,96	266	25	653	62	141	13
<b>Totais</b>	<b>12629</b>		<b>95</b>	<b>3,24</b>	<b>5851</b>	<b>49</b>	<b>4802</b>	<b>40</b>	<b>1360</b>	<b>11</b>



■ Bom - 5 885 km (51%) ■ Razoável - 4 149 km (38%) ■ Mediocre - 1 219 km (11%)

Outro dos cenários corresponde à definição da situação de intervenção. Segundo o Sistema de Avaliação da Qualidade (SAQ) da Estradas de Portugal, S.A., o valor limite de PSI para pavimentos que não apresentam características suficientes para a circulação dos veículos em condições de segurança e conforto é de 2.0 para a rede nacional. A este valor de PSI corresponde um IRI de cerca de 3.5 m/km. Está assim definido o cenário da situação de intervenção.

Definidos os cenários em termos dos valores médios, foram definidos os cenários correspondentes aos valores extremos, isto é, para pavimentos muito degradados e para pavimentos com muito boa qualidade. Para os pavimentos muito degradados decidiu-se considerar um PSI nulo, atingindo o limite da má qualidade. Pretendeu-se deste modo condicionar a estratégia de manutenção dos pavimentos, ou seja, que as entidades responsáveis não deixem a qualidade das estradas chegar a níveis muito baixos. Se a qualidade for muito baixa, os custos aumentarão consideravelmente, uma vez que a esta situação corresponde o factor de correcção mais elevado. À situação de PSI nulo corresponde um IRI de cerca de 4.25m/km, definido tendo em conta a formulação de PSI usada no SAQ da rede nacional, uma profundidade média de rodéiras de 35mm e uma área degradada dos pavimentos de 100%.

No extremo oposto encontram-se os cenários correspondentes a pavimentos de muito boa qualidade. Foram adoptados assim um PSI de 4.7 relativo a um pavimento novo, com um IRI correspondente a 0.5m/km. Considerou-se ainda um PSI máximo teórico de 5, mostrando que a partir do valor de PSI anterior não existem benefícios consideráveis, uma vez que o factor de correcção não se altera.

Esta análise permitiu assim a definição dos valores médios e extremos para a relação Factores de correcção para os COV em função do PSI para a rede rodoviária portuguesa. O quadro 4.16 sintetiza a proposta de formulação para a rede rodoviária portuguesa.

Quadro 4.16 - Factores de correcção para cenários de pavimentos Portugueses (adaptado de Santos et al, 2010)

Descrição do estado dos pavimentos	PSI	IRI [m/km]	Factores de Correcção para os COV
Mau	0,0	4,25	1,15
Necessidade de Intervenção	2,0	3,50	1,05
Situação de Referência	3,5	2,00	1,00
Bom	4,7	0,50	0,95
-	5,0	-	0,95

A quantificação dos factores de correcção não deriva de valores meramente propostos, surgiram com base em diversos parâmetros, entre os quais a tendência apontada pelos modelos estudados nos pontos anteriores, em particular os modelos que utilizavam o PSI na

sua formulação, e ainda a realidade/informação disponível sobre dados portugueses, incluindo as práticas actualmente em uso pela administração rodoviária portuguesa (Estradas de Portugal, S.A.).

O gráfico da figura 4.20 exhibe a proposta de formulação juntamente com os modelos (tratamento agregado do tráfego) que recorrem ao índice PSI para definir os factores de correcção dos COV.

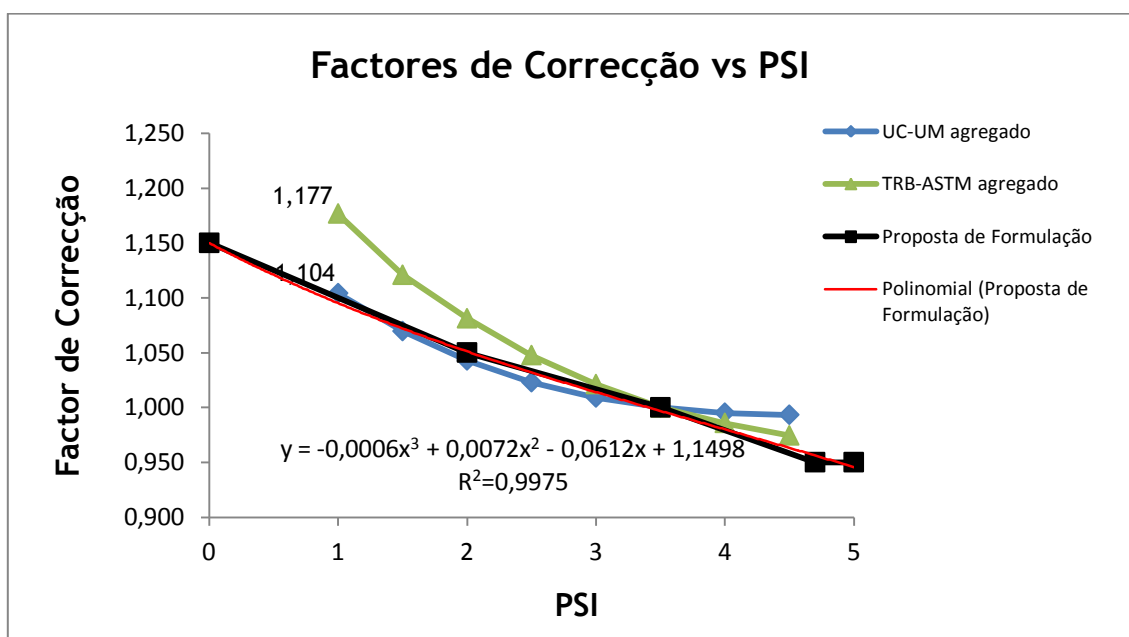


Figura 4.20 - Relação Factores de Correção do COV vs PSI para os modelos agregados que utilizam o PSI e para a Proposta de Formulação

Pela análise da figura 1 é possível concluir que a tendência da proposta formulada é semelhante à dos modelos estudados, mesmo considerando factores de correcção para pavimentos de pior qualidade menores que os recomendados pelo estudo TRB-ASTM. Esta situação pode ser justificada ao considerar os avanços tecnológicos dos veículos actuais em relação aos considerados à data do estudo TRB-ASTM e ao tipo de rede viária (rede nacional), onde não são comuns valores baixos de PSI (Santos et al, 2010).

Quando o pavimento apresenta muito boa qualidade, o ganho obtido é mais reduzido que nas outras situações de PSI com valores mais baixos. A partir de um PSI com cerca de 4, o ganho vai-se tornando praticamente nulo. Deste modo, e de acordo com os estudo abordados em relação ao PSI, o ganho obtido é de cerca de 2%, que corresponde a um factor de correcção de 0.98. O facto de na proposta de formulação se considerar ganhos de 5% pode ser entendido como um incentivo à manutenção dos pavimentos em bom estado, no entanto, a consideração de 5% em vez de 2%, na análise de uma rede rodoviária em funcionamento, influenciará pouco a variação dos CUE totais.

Ao traçar no gráfico a proposta de formulação foi possível obter uma equação polinomial de 3º grau bastante aproximativa aos cenários definidos, o que é comprovado pelo coeficiente de determinação  $R^2=0.9975$ . Deste modo, o desenvolvimento desta equação possibilitou a criação de uma relação que reflecte a variação dos COV em função do PSI através da obtenção de factores de correcção a aplicar ao COV médio. Assim, a variação do COV devido ao estado dos pavimentos é efectuada através das expressões 4.7 e 4.8.

$$FC_{COV,PSI} = -0.0006 \times PSI^3 + 0.0072 \times PSI^2 - 0.0612 \times PSI + 1.1498 \quad (4.7)$$

$$COV_{PSI} = FC_{COV,PSI} \times COV, \left[ \frac{\text{€}/\text{km}}{\text{dia}} \right] \quad (4.8)$$

Onde:

$FC_{COV,PSI}$  é o factor de correcção a aplicar ao COV médio para considerar o estado dos pavimentos;

$COV_{PSI}$  é o custo de Operação dos Veículos afectado pelo estado dos pavimentos.

Uma vez que a maioria das formulações existentes utilizam o IRI como principal parâmetro para calcular o PSI em redes de estradas nacionais, foram também realizadas as análises de sensibilidade considerando as variações do COV com o IRI. O gráfico da figura 4.21 apresenta as curvas para os modelos (tratamento agregado do tráfego) que recorrem ao IRI para definir os factores de correcção dos COV.

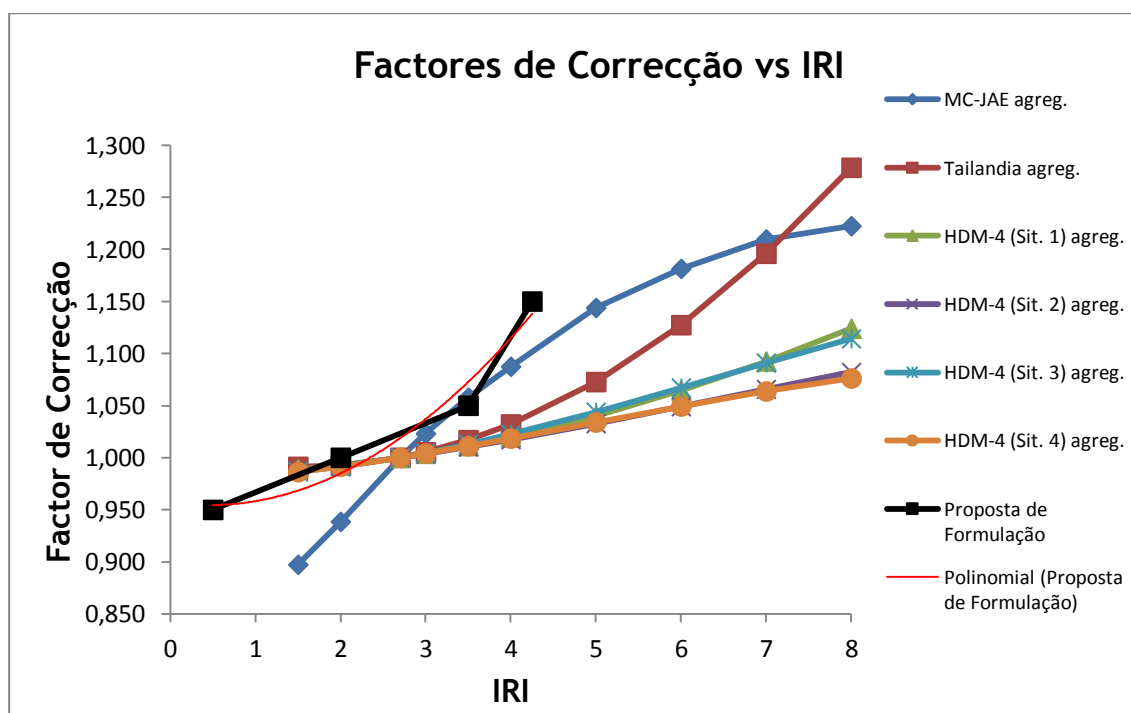


Figura 4.21 - Relação Factores de Correção do COV e CUE (HDM-4 Situações 1 e 2) vs IRI para os modelos estudados e para a proposta de formulação

No caso deste tipo de relações (Factor de correcção dos COV vs IRI), os modelos apresentam tendências menos homogêneas no seu conjunto em relação à relação anterior (Factor de correcção dos COV vs PSI), destacando-se pela diferença o modelo de custos da JAE.

Analisando a figura é possível verificar que a maioria dos modelos e a proposta de formulação apresenta resultados semelhantes para valores do IRI entre 0 e 3.0m/km, o que abrange uma parte bastante significativa do intervalo de valores típicos considerado para a rede nacional. No entanto, à semelhança do referido para os modelos em função do PSI, para valores de IRI baixos (pavimentos em bom estado) pode ser considerada a hipótese de diminuir o valor do ganho da proposta para cerca de 2%, o que corresponde a um factor de correcção de COV de 0,98.

Para valores de IRI entre 3 e 4,5 (pavimentos em mau estado), o modelo proposto apresenta valores de correcção mais elevados que a tendência dos modelos estudados, penalizando mais o COV. No entanto, nos modelos em função do PSI apresenta uma tendência menor (penaliza menos o custo). Estes valores contraditórios justificam um aprofundamento na definição deste valor extremo, no entanto, no intervalo de valores mais comuns segue a tendência dos modelos em função de PSI e IRI.

Valores acima de 4.5m/km, como os considerados por exemplo no HDM-4 para alguns países em desenvolvimento, não são frequentes nas redes rodoviárias nacionais.

Resta salientar sobre esta matéria que o índice adoptado pela formulação proposta para a definição do factor de correcção dos COV foi o PSI e, que o cálculo deste não depende unicamente do IRI, mas também de um conjunto de degradações superficiais dos pavimentos. Além disso, o sistema de gestão dos pavimentos adoptado pela administração das estradas portuguesas considera o índice PSI e não o IRI para avaliar o estado dos pavimentos da rede de estradas.

#### **4.5. Aplicação prática: Concessão Scutvias-A23**

Neste último ponto do capítulo pretende-se executar uma aplicação prática sobre o efeito do estado dos pavimentos quer nos custos de operação, quer nos custos globais dos utentes da estrada (CUE), pondo em prática o que tem vindo a ser estudado ao longo deste trabalho.

Para executar a aplicação considerou-se como caso de estudo uma rede rodoviária concessionada, a Sutvias (A23).

A aplicação consiste assim em determinar, para a concessão Sutvias, os CUE e suas parcelas através da aplicação do Modelo Português de CUE (Santos, 2007) para o ano de 2010. Posteriormente é feita uma análise da variação dos CUE e dos COV devida ao efeito do estado dos pavimentos. Inicialmente aplicou-se o Modelo Português de CUE sem ter em consideração

o efeito do estado dos pavimentos, isto é, calcularam-se os custos médios para os utentes, que correspondem aos custos para a situação de referência (factor de correcção dos COV igual a 1,0).

Para a aplicação do modelo, além dos dados sobre o troço em estudo, são ainda necessários dados respeitantes a consumos, quantidades, valores e custos para as quatro classes de veículos (VLP, VCL, VPM e VPP) e para o ano base de 2010. Os respeitantes aos consumos das componentes mantiveram-se em relação aos que foram definidos para o ano de 2006 (quadro 3.8 da página 56) Os novos dados de entrada no modelo são os expostos nos quadros 4.17 ao 4.19.

Quadro 4.17 - Dados de entrada do modelo específicos da concessão Scutvias

<b>Dados Scutvias 2010 (A-23)</b>		
Comprimento do troço [km]		177,5
Velocidades de Circulação [km/h]	VLP	120
	VCL	120
	VPM	100
	VPP	110
TMDA [veículos/dia]		10574
p <sub>i</sub> [%]	VLP	0,7972
	VCL	0,0648
	VPM	0,1289
	VPP	0,0091
Acidentes	com feridos ligeiros	59
	com feridos graves	10
	com vítimas mortais	22
Vítimas (nº)	feridos ligeiros	88
	feridos graves	15
	vítimas mortais	2
Custo da portagem [€/km/veículo]	VLP	0,0750
	VCL	0,0750
	VPM	0,1850
	VPP	0,1300

Quadro 4.18 - Dados de entrada do modelo sobre o custo dos acidentes (2010)

Custos da assistência aos acidentes (€/acidente)	Tipo de acidente	Com feridos ligeiros	Com feridos graves	Com vítimas mortais
	Assistência policial	57	160	250
	Assistência médica	18	103,5	103,5
Custos das vítimas (€/vítima)	Feridos ligeiros: 40000 €/vítima Feridos graves: 90000 €/vítima Vítimas mortais: 500000 €/vítima			

Quadro 4.19 - Dados de entrada do modelo referente aos custos para as classes de veículos consideradas

Parâmetro	VLP	VCL	VPM	VPP
Combustível	Preço de mercado (Dezembro/2010):	Preço de mercado (Dezembro/2010):	Preço de mercado (Dezembro/2010):	Preço de mercado (Dezembro/2010):
	Gasolina 95: 1.485 €/l Gasóleo: 1.270 €/l	Gasóleo: 1.27 €/l	Gasóleo: 1.27 €/l	Gasóleo: 1.27 €/l
Pneus	Preço de mercado: 75 €/pneu	Preço de mercado: 64,5 €/pneu	Preço médio de mercado: 490 €/pneu	Preço médio de mercado: 343,5 €/pneu
Manutenção preventiva	1625 €/10 anos	1920 €/8 anos	28920 €/12 anos	16835 €/12 anos
Desvalorização	17720 €/10 anos	11930 €/8 anos	87135 €/12 anos	22340 €/12 anos
Custo do tempo de percurso	6.93 €/h	6.93 €/h	9.61 €/h	9.61 €/h

Há ainda a salientar que os custos unitários adoptados foram obtidos com recurso a preços de mercado, isto é, correspondem ao custo unitário que o utente tem de pagar por determinada componente de custo, incluindo todas as taxas e impostos associados ao produto ou serviço prestado, constituindo o valor transaccionado na compra dos produtos ou serviços correspondentes (Santos, 2007). Para o caso do valor do tempo, o seu custo é considerado em função do que um empregador tem de pagar para ter a seu serviço um trabalhador, isto é, considerando para além da remuneração base, todos os prémios, subsídios e pagamento por horas extraordinárias, mas excluindo os custos de funcionamento (Santos, 2007)

Procedeu-se então à aplicação do modelo determinando os CUE. O procedimento de determinação dos custos é apresentado no anexo C deste documento. No final da aplicação obtiveram-se os resultados expressos no quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Determinação dos CUE médios para a concessão Scutvias (2010)

	Tipo de Custo				
	COV	CTP	CA	Cportagem	CUE
[€/km/dia]	<u>2613,90</u>	822,30	90,72	948,28	<u>4475,21</u>
% CUE	<u>58,4%</u>	18,4%	2,0%	21,2%	<u>100%</u>

Após a obtenção destes valores inicia-se a análise de variação dos custos devido ao efeito do estado dos pavimentos. Assim, numa primeira fase, analisa-se a variação da única parcela dos CUE considerada relevante, os COV. O resultado desta análise é apresentado no quadro 4.21.

Quadro 4.21 - Análise da variação dos COV com o estado dos pavimentos quantificado pelo PSI, para a concessão Scutvias (2010)

PSI	FC <sub>COV,PSI</sub>	COV <sub>médio</sub> [€/km/dia]	COV <sub>PSI</sub> [€/km/dia]	Δ COV <sub>PSI</sub> [%]
0	1,150	2613,90	3005,46	14,98
1	1,095		2862,74	9,52
1,5	1,072		2802,56	7,22
2	1,051		2748,26	5,14
2,5	1,032		2698,66	3,24
3	1,015		2652,59	1,48
3,5	0,998		2608,87	-0,19
4	0,982		2566,33	-1,82
4,5	0,966		2523,79	-3,45
4,7	0,959		2506,51	-4,11
5	0,949		2480,07	-5,12

Os resultados obtidos desta análise são, de certo modo, esperados, uma vez que a formulação proposta no ponto anterior contempla apenas afectar os COV e os factores de correcção determinados para cada nível de qualidade do pavimento resultam da percentagem obtida da variação. Alguns resultados menos exactos, como o facto de por exemplo para a situação de referência o factor de correcção não ser exactamente 1, está relacionado com o facto de, no cálculo do factor de correcção, se ter usado a expressão 4.7.

A segunda fase desta análise consiste em determinar as variações que ocorrem nos custos globais, isto é, de que maneira se comporta o CUE quando o COV é afectado pelo efeito do estado dos pavimentos. Sendo os COV a única parcela afectada pelo estado do pavimento, é certo que a variação dos CUE dependerá muito da percentagem que os COV representam nos custos globais. No entanto, como se abordou anteriormente, os COV são a parcela com maior expressão nos CUE, ultrapassando a maioria das vezes os 50% dos custos totais. No caso em estudo os COV ocupam uma percentagem de cerca de 58% dos custos totais, como se pode verificar pelo quadro 4.20. O CUE afectado pelo efeito do estado dos pavimentos (CUE<sub>PSI</sub>) é obtido pela expressão 4.9.

$$CUE_{PSI} = COV_{PSI} + CTP + CA + CPortagem, \left[ \frac{€/km}{dia} \right] \quad (4.9)$$

A determinação da variação dos CUE devida ao estado dos pavimentos encontra-se realizada no quadro 4.22. A figura 4.22 exhibe a relação da variação dos custos aqui abordados com o PSI.

Quadro 4.22 - Análise da variação dos CUE devida ao estado dos pavimentos quantificado pelo PSI, para a concessão Scutvias (2010)

PSI	FC <sub>COV,PSI</sub>	COV <sub>médio</sub> [€/km/dia]	CUE <sub>médio</sub> [€/km/dia]	COV <sub>PSI</sub> [€/km/dia]	CUE <sub>PSI</sub> [€/km/dia]	Δ CUE <sub>PSI</sub> [%]
0	1,150	2613,90	4475,21	3005,46	4866,77	8,75
1	1,095			2862,74	4724,05	5,56
1,5	1,072			2802,56	4663,87	4,22
2	1,051			2748,26	4609,56	3,00
2,5	1,032			2698,66	4559,97	1,89
3	1,015			2652,59	4513,90	0,86
3,5	0,998			2608,87	4470,18	-0,11
4	0,982			2566,33	4427,64	-1,06
4,5	0,966			2523,79	4385,10	-2,01
4,7	0,959			2506,51	4367,82	-2,40
5	0,949			2480,07	4341,38	-2,99

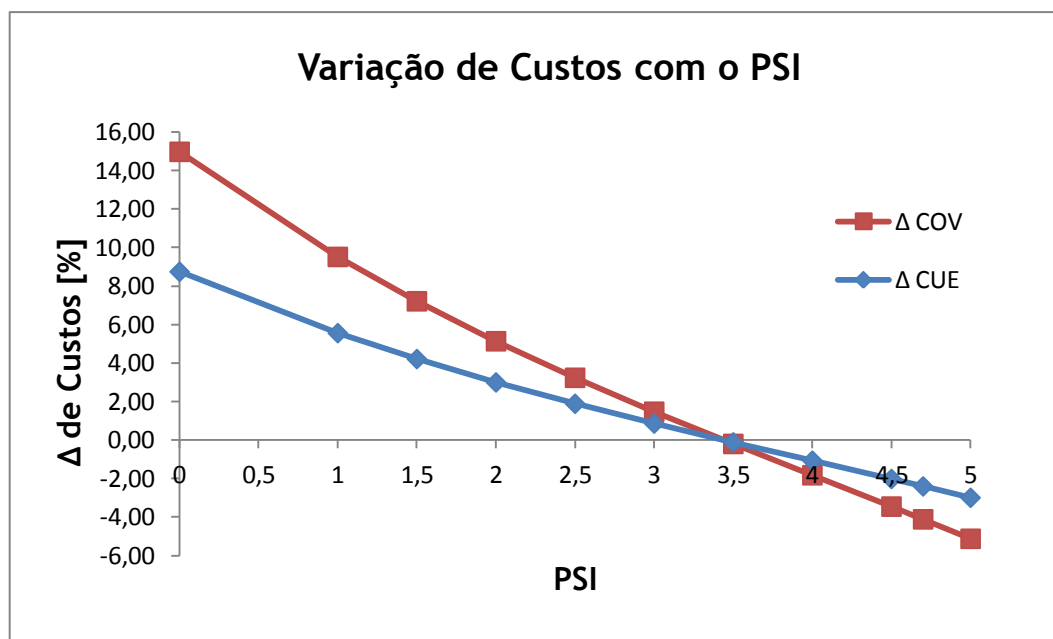


Figura 4.22 - Variação dos COV e CUE com o estado do pavimento quantificado pelo PSI

Os resultados obtidos relativamente à variação dos CUE evidenciam que este tipo de custos são afectados pelo estado dos pavimentos, mas numa escala menor que os COV, em função da contribuição desta parcela nos custos totais.

Pela observação dos quadros e da figura 4.22 pode verificar-se que, para uma estrada extremamente degradada, com um PSI teórico de 0 (zero), os custos totais podem ser acrescidos em quase 9%, e em 15% para os COV. No que concerne à situação de intervenção, ou seja, para um PSI de 2, os CUE ficam acrescidos em 3%, enquanto que nos COV o acréscimo é de cerca de 5%. Quando ocorre a situação contrária e o pavimento é de boa qualidade

apresentando um PSI, também teórico, de 5, existe uma diminuição dos custos totais em cerca de 3% e, dos COV de 5%.

## **5. Conclusões e trabalho futuro**

### **5.1. Conclusões finais**

Nos dias de hoje, cada vez é mais importante a determinação e avaliação de todas as componentes de custos relacionadas com os projectos rodoviários, levando a que aumente o interesse pelos projectos que incluem nos seus objectivos o desenvolvimento de metodologias de avaliação dos custos. Os custos relacionados com os utentes da estrada fazem parte desta estratégia, pois são de larga importância para os muitos utentes que circulam nas estradas nacionais.

Neste trabalho pretendeu-se validar uma formulação e avaliar os efeitos do estado dos pavimentos das redes rodoviárias nos custos dos utentes, mais concretamente na parcela dos custos de operação dos veículos, uma vez que esta é a parcela mais afectada por este efeito.

Ao longo do trabalho não se registaram nenhum tipo de conclusões alusivas aos assuntos abordados em cada capítulo, pelo que se apresentam no presente ponto as conclusões tidas como mais significativas e relevantes a que se chegou com a realização deste documento. Deste modo, será feita uma retrospectiva dos temas abordados e das principais conclusões adquiridas.

Uma das primeiras conclusões adquiridas com a realização do documento aqui apresentado foi a importância da inclusão dos CUE numa análise mais rigorosa dos custos do ciclo de vida das infra-estruturas rodoviárias, particularmente na análise dos seus pavimentos. A inclusão destes custos gera diversos benefícios, como por exemplo, a promoção de actuações prévias na rede, o que evita a degradação extrema dos pavimentos, e prevenindo intervenções de conservação mais onerosas e custos adicionais para os utentes.

Dos modelos estudados destacam-se o modelo do HDM-4, por ser o mais completo e o que permite a adaptação a qualquer rede ou cenário, e o Modelo Português de CUE, por ser o modelo mais recente desenvolvido para a rede rodoviária portuguesa.

Dentro dos CUE, a parcela mais importante, pela sua contribuição nos custos totais é a dos COV. Os COV dividem-se normalmente nas componentes de combustível, óleo, pneus, manutenção preventiva e desvalorização. O estudo efectuado a respeito das componentes permitiu concluir que, quer directa ou indirectamente, estas são afectadas pelo estado dos pavimentos, em particular pela sua irregularidade.

Ainda dentro da análise à parcela dos COV concluiu-se que estes representam a maior contribuição para os custos totais suportados pelos utentes e constituem a componente mais

estudada e a mais utilizada na definição destes custos, sendo este facto sustentado pelos modelos descritos e por estudos comparativos efectuados no âmbito do desenvolvimento do Modelo Português de CUE. Através destes estudos foi perceptível a elevada contribuição dos COV no total dos CUE, traduzidas por percentagens superiores a 65%, com uma média de 78% para os VLP e 89% para os VPM.

Os vários estudos e modelos considerados demonstram a influência do estado dos pavimentos nos COV. Para avaliar o estado dos pavimentos, todas as abordagens estudadas utilizam índices representativos da qualidade do pavimento, como o índice global PSI (“Present Serviceability Index”); ou características específicas da estrada que podem ser utilizadas para aferir essa mesma qualidade, como é o caso do IRI (“International Roughness Index”), que mede a irregularidade longitudinal de uma estrada. É através destes parâmetros que as metodologias estudadas avaliam a qualidade de um pavimento e definem os factores de agravamento ou benefício dos COV.

Sobre a forma como a avaliação da qualidade dos pavimentos pode ser realizada, concluiu-se que esta poderia ser efectuada segundo três metodologias diferentes: Avaliação Global, Avaliação Paramétrica e Avaliação Mista. A Avaliação Global é a metodologia adoptada neste estudo, já que permite a determinação da qualidade de um pavimento através do índice global de qualidade PSI e ainda pelo facto de este ser o tipo de avaliação adoptado no SAQ dos pavimentos da administração rodoviária portuguesa.

No seguimento dos assuntos abordados anteriormente e de uma análise geral dos diferentes estudos que abordam o tema do efeito do estado dos pavimentos nos COV e nas suas componentes, é possível obter um conjunto de indicações a respeito do grau de sensibilidade que estas apresentam ao estado dos pavimentos. Assim, as componentes mais sensíveis ao estado dos pavimentos são a dos pneus e a da manutenção e reparação. Todavia, esta análise não pode descorar o facto de que cada componente representa uma determinada contribuição nos COV totais. Apesar da componente dos pneus e da manutenção e reparação apresentarem uma sensibilidade elevada ao estado dos pavimentos, são também aquelas que menos contribuem para o valor total dos COV. Deste modo, a desvalorização, que apresenta sensibilidade média ao estado dos pavimentos, mas que tem um contributo significativo no total dos COV (em particular nos VLP), pode fazer com que se obtenham resultados mais significativos.

Ainda sobre este assunto foi possível concluir que a componente do combustível não varia consideravelmente com a variação do estado dos pavimentos. Este facto deriva da análise da situação em que um bom estado do pavimento leva à prática de velocidades mais elevadas e consequentemente a um consumo mais elevado de combustível. Deste modo, se o aumento da qualidade dos pavimentos pode gerar benefícios nas restantes componentes, o mesmo não se aplica ao combustível pelas razões enunciadas.

Os seguintes modelos que consideram o efeito do estado dos pavimentos nas suas formulações através do PSI ou IRI foram analisados para permitir a avaliação da proposta de formulação a incluir no modelo de CUE português:

- Estudo das Universidades de Coimbra e do Minho (PSI);
- Estudo do TRB e da ASTM (PSI);
- Modelo de Custos dos utentes da JAE (IRI);
- Estudo das Universidades de Walailak e North Dakota State (IRI);
- Modelo de Custos dos utentes da estrada do HDM-4 (IRI).

Ao testar os estudos/modelos na procura de factores de correcção do COV que tenham em conta o efeito do estado dos pavimentos, chegou-se à conclusão que os resultados obtidos validaram a proposta de formulação que já tinha sido realizada por um grupo de investigadores, no intervalo de valores mais correntes para as redes rodoviárias nacionais. No entanto, é possível propor um refinamento para os ganhos relativos aos pavimentos em muito bom estado, já que os resultados dos estudos apontam para benefícios de cerca de 2%, em vez dos 5% apresentados pela proposta. Já para o limite referente aos pavimentos em muito mau estado, os resultados apontam para a realização de análises mais cuidadas, uma vez que os resultados apontam para direcções um pouco diferentes. É necessário por isso analisar este caso com mais pormenor.

Na última parte do trabalho efectuou-se uma aplicação prática onde se calcularam os CUE e as suas parcelas através da aplicação do Modelo Português de CUE à rede rodoviária concessionada à Scutvias (A23). Quando os efeitos do estado dos pavimentos foram considerados na análise, chegou-se à conclusão que os COV, como era de esperar, apresentaram uma variação de acordo com o factor de correcção aplicado, variando entre -5% para pavimentos muito bons e +15% para pavimentos muito degradados. As situações mais comuns de degradação dos pavimentos, justificativas da realização de operações de intervenção correspondem a custos adicionais dos COV de cerca de 5%. Já nos custos globais, os CUE apresentaram uma variação de quase 9% para um pavimento de PSI nulo, ou seja, muito degradado. Relativamente à situação de intervenção, para um PSI de 2, a variação obtida foi de 3%. Conclui-se no entanto que estas percentagens de acréscimo estão directamente relacionadas com a proporção dos COV nos CUE, uma vez que quanto maior a contribuição dos COV nos CUE, maior será a variação obtida nos CUE.

## **5.2. Recomendações para trabalhos futuros**

A aplicação de novos métodos ou investigações que possam contribuir para uma melhor quantificação de todos os custos rodoviários é de extrema importância para os utentes e para a sociedade em geral. Deste modo, o desenvolvimento de novos processos e conhecimentos, em particular relacionados com os custos dos utentes, são sempre um contributo para que

estes sejam, cada vez mais, considerados pelas administrações rodoviárias na avaliação de projectos e na gestão deste tipo de infra-estruturas.

Constatando-se que este é um domínio que deve ser alvo de investigação, sugerem-se, dentro dos temas abordados neste documento, alguns aspectos a desenvolver futuramente:

- Sustentar melhor a definição dos factores de correcção do COV extremos para o intervalo de valores de PSI e IRI considerados na análise do efeito do estado dos pavimentos;
- Avaliar a magnitude dos custos adicionais de operação dos veículos nos custos e totais para os utentes devidos ao estado dos pavimentos para redes de estradas do tipo IP, IC, ER e EN;
- Completar a formulação com a consideração do acréscimo ou diminuição do custo dos acidentes devido ao estado dos pavimentos das redes, já que a má qualidade dos pavimentos pode dar origem a uma maior probabilidade de ocorrência de acidentes e vice-versa.

## 6. Referência Bibliográfica

ACPA (2002). “The International Roughness Index (IRI): What is it? How is it measured? What do you need to know about it?”, Concrete Pavement Research & Technology, American Concrete Pavement Association, USA.

Anderson, S.D.; Memmott, J.K.; Patil, S.S. (1992). “Road a User Costs and the Influence of Pavemet Type - A Perspective”. Texas Transportation Institute (TTI), Research Project 0440, Texas.

Antunes, M. L. (2005) “Modelação do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis”, LNEC, Programa de Investigação e Programa de Pós-Graduação, Lisboa.

ASTM (1983). “Measuring Road Roughness and Its Effects on User Costs and Comfort”. STP 884, American Society for Testing and Materials, USA.

Barnes, Gary et Langworthy, Peter (2003). “The Per-mile cost of operating automobiles and trucks”. University of Minnesota, Minnesota Department of Transportation, USA.

Bennett, Christopher (1995). “Review of Experience Adapting the HDM Vehicle Operating Costs Model”. Report to the International Study of Highway Development and Management Tools, University of Birmingham.

Bennett, Christopher et Greenwood, Ian (2003). “Modelling road use rand environmental effects in HDM-4”. Volume seven, The Highway Development and Management Series, PIARC, Version 3.0, Paris (France).

Biggs, D.C. (1988). ARFCOM - Models For Estimating Light to Heavy Vehicle Fuel Consumption. Research Report ARR 152, Australian Road Research Board, Nunawading.

Branco, Fernando; Pereira, Paulo; Santos, Luís Picado (2008). “Pavimentos Rodoviários”. Edições Almedina, ISBN 978-972-40-2648-0, Coimbra (Portugal).

Caroff, Gilbert; Marchand, Jean-Pierre; Raphael, Jacques (1989). “Test du Système de Gestion de l’Etat de Washington (WSPMS) sur Quelques Sections Autoroutières Françaises”, Paris.

Chesher, A. et Harrison, R. (1987). “Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries”. World Bank Publications, Johns Hopkins Press.

Claffey, P. (1971). "Running Cost of Motor Vehicles as Affected by Road Design and Traffic". NHCPR Report 111, Highway Research Board, Washington, D.C.

COBA @ (2006), <http://www.dft.gov.uk/pgr/economics/software/coba11usermanual/>, COBA 11 user manual, Volume 13: "Economic Assessment of Road Schemes, Section 1: The COBA Manual". Department for Transport, United Kingdom.

CRRRI (1982). "Road User Cost Study in India". Central Road Research Institute, New Delhi, India.

Cundill, M. (1993). "RTIM3 Manual". Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.

Daniels, G.; Ellis, D.; Stockton, W. @ (1999), <http://tti.tamu.edu/documents/407730.pdf>. "Techniques for Manually Estimating Road User Costs Associated with Construction Projects". Texas Transportation Institute, Texas, EUA.

Delanne, Y.(1997), "Uni des chaussées et confort vibratoire des véhicule". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France.

Ferreira, A. (1997). "SIGPAV - Sistema de Gestão da Conservação da Rede Rodoviária com recurso à Tecnologia dos Sistemas de Informação Geográfica". Ingenium, Vol. 28, pp. 64 - 68, 1997.

Ferreira, A.; Picado-Santos, L.; Antunes, A. (2000). "Optimização da Conservação e Reabilitação de Redes Rodoviárias Utilizando Modelos Determinísticos de Previsão da Evolução do Estado dos Pavimentos". 1º Congresso Rodoviário Português, Vol. I, pp. 337 - 348, LNEC, Lisboa.

Fontul, Simona (2006). "Caracterização do estado dos pavimentos: Características superficiais". Elementos de apoio ao curso "Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários", LNEC, Lisboa.

FP (2001), "Pavement Preservation Today". Foundation for Pavement Preservation, Vol.2, nº1, Virginia.

Freitas, E.; Pereira, P. (2001). "Estado da Evolução do Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis", Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, nº 11, Guimarães.

GEPA - Gestão de Pavimentos, Lda. (1995). "Sistema de Gestão da Conservação. Sistema de Custos dos Utentes". JAE - Contrato 4915, Lisboa.

HRB (1962) “The AASHO road test”, Highway Research Board, Report 5 - Pavement Research, Special Report 61E, National Academy of Sciences.

HTC (1999). “Preparation of Revised Project Evaluation Manual VOC Tables”. Report TF/99/3. HTC Infrastructure Management Ltd., Auckland, New Zealand.

Ihs, Anita et Sjögren, Leif (2003). “An overview of HDM-4 and the Swedish Pavement Management System (PMS)”.

JAE (actual EP - Estradas de Portugal) (1985). 2º Plano Rodoviário Nacional.

JAE (actual EP - Estradas de Portugal) (1997) “Catálogo de Degradações dos Pavimentos para a rede rodoviária nacional”. Junta Autónoma de Estradas, Almada, Portugal.

JAE (actual EP - Estradas de Portugal) (1998). Plano Rodoviário Nacional 2000.

LNEC@ (2007). [http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nif/imagens/perfilometro\\_b.jpg/view](http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nif/imagens/perfilometro_b.jpg/view) “Perfilómetro Laser”, Departamento de Transportes, Núcleo de Infra-estruturas, Lisboa.

Matos, A. (1997). “A Observação de Pavimentos na Junta Autónoma de Estradas”. Colóquio Sobre Conservação. Junta Autónoma de Estradas, Lisboa, 1997.

Menezes, Miguel (2008). “Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Minhoto, Joaquim (2005). “Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho - Escola de Engenharia.

Nortström, O. et Andersson, O. (1995). “Swedish Research on Tyre Consumption”. Report to the International Study of Highway Development and Management Tools, University of Birmingham, UK.

OCDE (1994). “L’Allocation des Ressources pour les Programmes d’Entretien et de Remise en Etat des Routes”. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Rapport Final, Paris.

OCDE (2001). “Performance Indicators for the Road Sector - Summary of the Field Tests”. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, France.

Paterson, D. (1987). “Pavement Management Practices”. Transportation Research Board. Washington.

Pereira, Paulo et Miranda, Valverde (1999). “Gestão da conservação dos pavimentos rodoviários”. Universidade do Minho, Braga (Portugal).

Pereira, Ricardo (2010). “Análise Custo-Benefício de Infra-Estruturas Rodoviárias - Metodologias de Implementação”. Dissertação de Mestrado, Instituto superior de engenharia de Lisboa, Lisboa (Portugal).

Picado-Santos, Luís; Ferreira, Adelino; Pereira, Paulo (2006). “Estruturação de um Sistema de Gestão de Pavimentos para uma Rede Rodoviária de Carácter Nacional”, Universidade do Minho, Braga, Portugal).

Pienaar, W. (1984). “Olieverbruik van Padvoertuie in Suid-Afrika”. NITRR Report RT/5, National Institute of Transport and Road Research, CSIR, Pretoria, South Africa.

Prakash, A.; Sharma, B. N.; Kazimierowski, T. J. (1993). “Management and Preservation of Pavements”, Pavement Design, Evaluation and Management Section, Ontario, Canada.

Rodrigues, Maria João (2007). “Avaliação Económica de projectos rodoviários em Portugal - Estimação de Custos e Benefícios para os utentes”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Santos, Bertha (2007). “Modelação dos Custos dos Utentes na Gestão da Estrada”. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Santos, Bertha (2002). “Implementação de um Sistema de Gestão da Conservação de Pavimentos Rodoviários para a cidade de Lisboa”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Santos, Bertha; Picado-Santos, Luís; Cavaleiro, Victor (2009a) "Custos Adicionais dos Utentes das Estradas devidos ao Estado dos Pavimentos e às Acções de Manutenção". Primeiros Desenvolvimentos", 5ª Conferência de Engenharia - Engenharia'2009 - Inovação e Desenvolvimento, UBI, Covilhã, 25 - 27 de Novembro.

Santos, Bertha; Picado-Santos, Luís; Cavaleiro, Victor; (2009b) "Definição, Análise e Aplicação de um Modelo de Custos dos Utentes Simplificado para a Rede Rodoviária Portuguesa", XV CILA - Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, Lisboa, Portugal, 22 - 27 de Novembro

Sebaaly, P. E.; Hand, A.; Epps, J.; Bosch, C. (1996). “Nevada’s Approach to Pavement Management”, Transportation Research Record, Vol. 1524.

Shoji, Eunice; Leomar, José, Fukuda, Tadashi (1998). “Desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos em nível de rede para a cidade de Sendai-Japão”. Universidade de São Paulo, Universidade de Tohoku.

Teixeira, João (2011). “Análise do Efeito dos Troços em Obras nos Custos Suportados pelos Utentes das Estradas”. Dissertação de Mestrado, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Transfund (2003). “Using the NZVOC Model to Prepare PEM Vehicle Operating Costs”, New Zealand.

TRB (2006). “Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy - Informing Consumers, improving Performance”. Transportation Research Board, TRR Special Report 286, Washington, EUA.

Trindade, Manuela et Horta, Carlos (2009). “O Sistema de Gestão de Pavimentos da EP - Estradas de Portugal, S.A. A sua implementação e exploração como ferramenta de apoio à gestão”. Comunicação submetida ao Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, FIL - Parque das Nações, Lisboa, Portugal 22 a 27 Novembro.

Walls, James et Smith, Michael R. (1998). “Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design”. Publication FHWA-SA-98-079, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

Watanatada, T.; Harral, C.; Paterson, W.; Dhareshwar, A.; Bhandari, A.; Tsunokawa, K. (1987). “The Highway Design and Maintenance Standards Model, Volume 1 - Description”. The World Bank, John Hopkins University Press.

Wipulanusat, Warit et Herabat, Pannapa (2007) “Road user Benefits Transfer: the Case of Contingent Valuation Method and Vehicle Operating Cost”. Walailak University (Tailândia) e North Dakota State University (Estados Unidos da América).

World Bank, The (2010). “HDM-4 Road User Costs Model”. Version 2.00, Washington D. C.

Yoder, E. J. et Witczark, M. W. (1975). “Principles of Pavement Design”. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Zaniewski, John (1983). “Fuel consumption related to roadway characteristics (Discussion and closure)”. West Virginia University, Transportation Research Board.

Zaniewski, J. P. et Butler, B. C. (1983). “Vehicle Operating Costs Related to Operating Mode, Road Design, and Pavement Condition”. Measuring Road Roughness and Its Effects on User

Cost and Comfort, ASTM STP 884, T. D. Gillespie and Michael Sayers, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

## **ANEXOS**



## **Anexo A**

# **Quadros de introdução dos dados do modelo de custos dos utentes da estrada do HDM-4 para as situações estudadas**

## A1 - Situação 1: Resultados em termos de CUE a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito pelo modelo

Quadro A1 - Custos unitários relacionados com as classes veículos para a situação 1

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)				
	New	New		Lubricating	Maintenance
	Vehicle	Tire	Fuel	Oil	Labor
	(\$/vehicle)	(\$/tire)	(\$/liter)	(\$/liter)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	13000	50	0,60	2,60	2,00
Truck Articulated (VPM)	110000	350	0,50	2,60	4,00

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)					
	Crew	Annual	Annual	Passenger	Passenger	Cargo
	Wages	Overhead	Interest	Working	Non-Working	Cargo
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	Time	Time	Time
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	(\$/hour)	(\$/hour)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	0,00	100	12,00	1,70	0,50	0,00
Truck Articulated (VPM)	4,00	6000	12,00	0,70	0,30	0,10

Quadro A2 - Características básicas das classes de veículos para a situação 1

Vehicle Description	Basic Vehicle Fleet Characteristics						
	Annual	Annual			Number	Work Related	Gross
	km	Working	Service	Private	of	Passengers	Vehicle
Driven	Hours	Life	Use	Passengers	Trips	Weight	
(km)	(hours)	(years)	(%)	(#)	(%)	(t)	
Car Medium (VLP)	23000	550	10,00	100,0	2,00	75,00	1,20
Truck Articulated (VPM)	85000	2000	12,00	0,0	1,00	0,00	28,00

Quadro A3 - Custos unitários das emissões para a atmosfera para a situação 1

Emissions Unit Costs (\$ per ton)						
Carbon	Carbon		Nitrous		Sulfur	
Dioxide	Monoxide	Hydrocarbon	Oxide	Particulate	Dioxide	Lead
15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A4 - Custos relacionados com a segurança na estrada para a situação 1

Road Safety Costs	
GDP per capita (\$/person)	3.000
Factor to multiply GDP per capita to obtain fatality cost	70
Serious injuries cost as a percent of fatality cost	25%
Fatality cost (\$/fatality)	210.000
Serious injury cost (\$/serious injury)	52.500

Quadro A5 - Características da estrada para a situação 1

Road Condition			Road Geometry				
Road Roughness (IRI, m/km)	Carriageway Width (m)	Surface Code (1-Paved / 2-Unpaved)	Rise & Fall (m/km)	Number of Rise & Fall per km (#)	Horizontal Curvature (degrees/km)	Super_ elevation (%)	Altitude (m)
2,0	7,0	1	1	1	3	2,0	0

Speed Adjustment Factors				Rolling Resistance Factors		
Speed Limit (km/hour)	Speed Limit Enforcement (#)	Roadside Friction (#)	Non Motorized Traffic Friction (#)	Percent Time Driven on Water (%)	Percent Time Driven on Snow (%)	Paved Roads Texture Depth (mm)
110	1,10	1,00	1,00	20	0	0,70

Quadro A6 - Taxa de acidentes das classes de veículos para a situação 1

Vehicle Fleet Accident Rates		
	Fatality	Serious Injury
Number per 100 million vehicle-km	3	30

Quadro A7 - Tráfego da estrada para a situação 1

Road Traffic	
Vehicle Description	Average Annual Daily Traffic (AADT)
Car Medium	5330
Truck Articulated	585
<b>Total</b>	<b>5915</b>

Quadro A8 - Padrão de fluxo de tráfego para a situação 1

Traffic Flow Pattern				
Percentage of Annual Traffic on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2,17	7,59	11,64	40,24	38,36
Σ	100			
Number of Hours Per Year on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(#)	(#)	(#)	(#)	(#)
87,6	350,4	613,2	2978,4	4730,4
Σ	8760			
Speed Flow Type				
Ultimate Capacity	Free-Flow Capacity	Nominal Capacity	Jam Speed at Capacity	Number of Lanes
(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(km/hour)	(#)
1400	140	1260	25	2
Desired Speed Adjustment Factor	Acceleration Noise Parameters		Operating Speed Adjustment Factor	Acceleration Effects
(#)	zadral (m/s2)	zamaxr (m/s2)	(#)	(1-Yes, 0-No)
1	0,10	0,65	1,0	0

Quadro A9 - Parâmetros de sensibilidade para a situação 1

Roughness Sensitivity		Speed Limit Sensitivity							
Minimum Roughness (IRI, m/km)	1,5	Minimum Speed Limit (km/hour)	20						
Maximum Roughness (IRI, m/km)	8	Maximum Speed Limit (km/hour)	110						
Traffic Sensitivity									
Average Annual Daily Traffic and Traffic Composition per Traffic Level									
Traffic Level	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Average Annual Daily Traffic (AADT)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
Vehicle	Typical Traffic Composition (%)								
Car Medium	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
Truck Articulated	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

## A2 - Situação 2: Resultados em termos de CUE a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010

Quadro A10 - Custos unitários relacionados com as classes veículos para a situação 2

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)				
	New Vehicle	New Tire	Fuel	Lubricating Oil	Maintenance Labor
	(\$/vehicle)	(\$/tire)	(\$/liter)	(\$/liter)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	19000	75	1,38	0,00	40,00
Truck Articulated (VPM)	104000	490	1,27	0,00	40,00

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)					
	Crew Wages	Annual Overhead	Annual Interest	Passenger Working Time	Passenger Non-Working Time	Cargo Time
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	(\$/hour)	(\$/hour)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	6,93	100	12,00	0,00	1,73	0,00
Truck Articulated (VPM)	9,61	6000	12,00	0,00	0,00	9,61

Quadro A11 - Características básicas das classes de veículos para a situação 2

Vehicle Description	Basic Vehicle Fleet Characteristics						
	Annual km Driven	Annual Working Hours	Service Life	Private Use	Number of Passengers	Work Related Passengers Trips	Gross Vehicle Weight
	(km)	(hours)	(years)	(%)	(#)	(%)	(t)
Car Medium (VLP)	20000	550	10,00	100,0	2,00	75,00	1,10
Truck Articulated (VPM)	85000	2000	12,00	0,0	1,00	0,00	40,00

Quadro A12 - Custos unitários das emissões para a atmosfera para a situação 2

Emissions Unit Costs (\$ per ton)						
Carbon Dioxide	Carbon Monoxide	Hydrocarbon	Nitrous Oxide	Particulate	Sulfur Dioxide	Lead
15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A13 - Custos relacionados com a segurança na estrada para a situação 2

Road Safety Costs	
GDP per capita (\$/person)	4.072
Factor to multiply GDP per capita to obtain fatality cost	70
Serious injuries cost as a percent of fatality cost	25%
Fatality cost (\$/fatality)	285.040
Serious injury cost (\$/serious injury)	71.260

Quadro A14 - Características da estrada para a situação 2

Road Condition			Road Geometry				
Road Roughness (IRI, m/km)	Carriageway Width (m)	Surface Code (1-Paved / 2-Unpaved)	Rise & Fall (m/km)	Number of Rise & Fall per km (#)	Horizontal Curvature (degrees/km)	Super_elevation (%)	Altitude (m)
2,0	7,5	1	1	1	3	2,0	0

Speed Adjustment Factors				Rolling Resistance Factors		
Speed Limit (km/hour)	Speed Limit Enforcement (#)	Roadside Friction (#)	Non Motorized Traffic Friction (#)	Percent Time Driven on Water (%)	Percent Time Driven on Snow (%)	Paved Roads Texture Depth (mm)
120	1,10	1,00	1,00	20	0	0,70

Quadro A15 - Taxa de acidentes das classes de veículos para a situação 2

Vehicle Fleet Accident Rates		
	Fatality	Serious Injury
Number per 100 million vehicle-km	3	30

Quadro A16 - Tráfego da estrada para a situação 2

Road Traffic	
Vehicle Descripton	Average Annual Daily Traffic (AADT)
Car Medium	5330
Truck Articulated	585
Total	5915

Quadro A17 - Padrão de fluxo de tráfego para a situação 2

Traffic Flow Pattern				
Percentage of Annual Traffic on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2,17	7,59	11,64	40,24	38,36
Σ	100			
Number of Hours Per Year on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(#)	(#)	(#)	(#)	(#)
87,6	350,4	613,2	2978,4	4730,4
Σ	8760			
Speed Flow Type				
Ultimate Capacity	Free-Flow Capacity	Nominal Capacity	Jam Speed at Capacity	Number of Lanes
(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(km/hour)	(#)
1600	320	1440	30	2
Desired Speed Adjustment Factor	Acceleration Noise Parameters	Operating Speed Adjustment Factor	Acceleration Effects	
(#)	zadral (m/s2)	zamaxr (m/s2)	(#)	(1-Yes, 0-No)
1	0,10	0,65	1,0	0

Quadro A18 - Parâmetros de sensibilidade para a situação 2

Roughness Sensitivity		Speed Limit Sensitivity							
Minimum Roughness (IRI, m/km)	1,5	Minimum Speed Limit (km/hour)	20						
Maximum Roughness (IRI, m/km)	8	Maximum Speed Limit (km/hour)	120						
Traffic Sensitivity									
Average Annual Daily Traffic and Traffic Composition per Traffic Level									
Traffic Level	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Average Annual Daily Traffic (AADT)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
Vehicle	Typical Traffic Composition (%)								
Car Medium	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
Truck Articulated	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

### A3 - Situação 3: Resultados em termos de COV a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito pelo modelo, considerando apenas as componentes de COV

Quadro A19 - Custos unitários relacionados com as classes veículos para a situação 3

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)				
	New	New		Lubricating	Maintenance
	Vehicle	Tire	Fuel	Oil	Labor
	(\$/vehicle)	(\$/tire)	(\$/liter)	(\$/liter)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	13000	50	0,60	2,60	2,00
Truck Articulated (VPM)	110000	350	0,50	2,60	4,00

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)					
	Crew	Annual	Annual	Passenger	Passenger	Cargo
	Wages	Overhead	Interest	Working	Non-Working	Cargo
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	Time	Time	Time
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	(\$/hour)	(\$/hour)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	0,00	100	12,00	0,00	0,00	0,00
Truck Articulated (VPM)	4,00	6000	12,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A20 - Características básicas das classes de veículos para a situação 3

Vehicle Description	Basic Vehicle Fleet Characteristics						
	Annual	Annual			Number	Work Related	Gross
	km	Working	Service	Private	of	Passengers	Vehicle
Driven	Hours	Life	Use	Passengers	Trips	Weight	
(km)	(hours)	(years)	(%)	(#)	(%)	(t)	
Car Medium (VLP)	23000	550	10,00	100,0	2,00	75,00	1,20
Truck Articulated (VPM)	85000	2000	12,00	0,0	1,00	0,00	28,00

Quadro A21 - Custos unitários das emissões para a atmosfera para a situação 3

Emissions Unit Costs (\$ per ton)						
Carbon	Carbon		Nitrous		Sulfur	
Dioxide	Monoxide	Hydrocarbon	Oxide	Particulate	Dioxide	Lead
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A22 - Custos relacionados com a segurança na estrada para a situação 3

Road Safety Costs	
GDP per capita (\$/person)	0
Factor to multiply GDP per capita to obtain fatality cost	70
Serious injuries cost as a percent of fatality cost	25%
Fatality cost (\$/fatality)	0
Serious injury cost (\$/serious injury)	0

Quadro A23 - Características da estrada para a situação 3

Road Condition			Road Geometry				
Road Roughness (IRI, m/km)	Carriageway Width (m)	Surface Code (1-Paved / 2-Unpaved)	Rise & Fall (m/km)	Number of Rise & Fall per km (#)	Horizontal Curvature (degrees/km)	Super_elevation (%)	Altitude (m)
2,0	7,0	1	1	1	3	2,0	0

Speed Adjustment Factors				Rolling Resistance Factors		
Speed Limit (km/hour)	Speed Limit Enforcement (#)	Roadside Friction (#)	Non Motorized Traffic Friction (#)	Percent Time Driven on Water (%)	Percent Time Driven on Snow (%)	Paved Roads Texture Depth (mm)
110	1,10	1,00	1,00	20	0	0,70

Quadro A24 - Taxa de acidentes das classes de veículos para a situação 3

Vehicle Fleet Accident Rates		
	Fatality	Serious Injury
Number per 100 million vehicle-km	0	0

Quadro A25 - Tráfego da estrada para a situação 3

Road Traffic	
Vehicle Description	Average Annual Daily Traffic (AADT)
Car Medium	5330
Truck Articulated	585
Total	5915

Quadro A26 - Padrão de fluxo de tráfego para a situação 3

Traffic Flow Pattern				
Percentage of Annual Traffic on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2,17	7,59	11,64	40,24	38,36
Σ	100			
Number of Hours Per Year on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(#)	(#)	(#)	(#)	(#)
87,6	350,4	613,2	2978,4	4730,4
Σ	8760			
Speed Flow Type				
Ultimate Capacity	Free-Flow Capacity	Nominal Capacity	Jam Speed at Capacity	Number of Lanes
(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(km/hour)	(#)
1400	140	1260	25	2
Desired Speed Adjustment Factor	Acceleration Noise Parameters		Operating Speed Adjustment Factor	Acceleration Effects
(#)	zadral (m/s2)	zamaxr (m/s2)	(#)	(1-Yes, 0-No)
1	0,10	0,65	1,0	0

Quadro A27 - Parâmetros de sensibilidade para a situação 3

Roughness Sensitivity		Speed Limit Sensitivity							
Minimum Roughness (IRI, m/km)	1,5	Minimum Speed Limit (km/hour)						20	
Maximum Roughness (IRI, m/km)	8	Maximum Speed Limit (km/hour)						110	
Traffic Sensitivity									
Average Annual Daily Traffic and Traffic Composition per Traffic Level									
Traffic Level	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Average Annual Daily Traffic (AADT)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
Vehicle	Typical Traffic Composition (%)								
Car Medium	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
Truck Articulated	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

## A4 - Situação 4: Resultados em termos de COV a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010, considerando apenas as componentes dos COV

Quadro A28 - Custos unitários relacionados com as classes veículos para a situação 4

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)				
	New Vehicle	New Tire	Fuel	Lubricating Oil	Maintenance Labor
	(\$/vehicle)	(\$/tire)	(\$/liter)	(\$/liter)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	19000	75	1,38	0,00	40,00
Truck Articulated (VPM)	104000	490	1,27	0,00	40,00

Vehicle Description	Economic or Financial Unit Costs (\$)					
	Crew Wages	Annual Overhead	Annual Interest	Passenger Working Time	Passenger Non-Working Time	Cargo Time
	(\$/hour)	(\$/year)	(%)	(\$/hour)	(\$/hour)	(\$/hour)
Car Medium (VLP)	6,93	100	12,00	0,00	0,00	0,00
Truck Articulated (VPM)	9,61	6000	12,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A29 - Características básicas das classes de veículos para a situação 4

Vehicle Description	Basic Vehicle Fleet Characteristics						
	Annual km Driven	Annual Working Hours	Service Life	Private Use	Number of Passengers	Work Related Passengers Trips	Gross Vehicle Weight
	(km)	(hours)	(years)	(%)	(#)	(%)	(t)
Car Medium (VLP)	20000	550	10,00	100,0	2,00	75,00	1,10
Truck Articulated (VPM)	85000	2000	12,00	0,0	1,00	0,00	40,00

Quadro A30 - Custos unitários das emissões para a atmosfera para a situação 4

Emissions Unit Costs (\$ per ton)						
Carbon Dioxide	Carbon Monoxide	Hydrocarbon	Nitrous Oxide	Particulate	Sulfur Dioxide	Lead
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro A31 - Custos relacionados com a segurança na estrada para a situação 4

Road Safety Costs	
GDP per capita (\$/person)	0
Factor to multiply GDP per capita to obtain fatality cost	70
Serious injuries cost as a percent of fatality cost	25%
Fatality cost (\$/fatality)	0
Serious injury cost (\$/serious injury)	0

Quadro A32 - Características da estrada para a situação 4

Road Condition			Road Geometry				
Road Roughness (IRI, m/km)	Carriageway Width (m)	Surface Code (1-Paved / 2-Unpaved)	Rise & Fall (m/km)	Number of Rise & Fall per km (#)	Horizontal Curvature (degrees/km)	Super_elevation (%)	Altitude (m)
2,0	7,5	1	1	1	3	2,0	0

Speed Adjustment Factors				Rolling Resistance Factors		
Speed Limit (km/hour)	Speed Limit Enforcement (#)	Roadside Friction (#)	Non Motorized Traffic Friction (#)	Percent Time Driven on Water (%)	Percent Time Driven on Snow (%)	Paved Roads Texture Depth (mm)
120	1,10	1,00	1,00	20	0	0,70

Quadro A33 - Taxa de acidentes das classes de veículos para a situação 4

Vehicle Fleet Accident Rates		
	Fatality	Serious Injury
Number per 100 million vehicle-km	0	0

Quadro A34 - Tráfego da estrada para a situação 4

Road Traffic	
Vehicle Description	Average Annual Daily Traffic (AADT)
Car Medium	5330
Truck Articulated	585
<b>Total</b>	<b>5915</b>

Quadro A35 - Padrão de fluxo de tráfego para a situação 4

Traffic Flow Pattern				
Percentage of Annual Traffic on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2,17	7,59	11,64	40,24	38,36
Σ	100			
Number of Hours Per Year on Each Period				
Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5
(#)	(#)	(#)	(#)	(#)
87,6	350,4	613,2	2978,4	4730,4
Σ	8760			
Speed Flow Type				
Ultimate Capacity	Free-Flow Capacity	Nominal Capacity	Jam Speed at Capacity	Number of Lanes
(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(pcse/hour/lane)	(km/hour)	(#)
1600	320	1440	30	2
Desired Speed Adjustment Factor	Acceleration Noise Parameters	Operating Speed Adjustment Factor	Acceleration Effects	
(#)	zadral (m/s2)	zamaxr (m/s2)	(#)	(1-Yes, 0-No)
1	0,10	0,65	1,0	0

Quadro A36 - Parâmetros de sensibilidade para a situação 4

Roughness Sensitivity		Speed Limit Sensitivity							
Minimum Roughness (IRI, m/km)	1,5	Minimum Speed Limit (km/hour)	20						
Maximum Roughness (IRI, m/km)	8	Maximum Speed Limit (km/hour)	120						
Traffic Sensitivity									
Average Annual Daily Traffic and Traffic Composition per Traffic Level									
Traffic Level	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Average Annual Daily Traffic (AADT)	5	20	65	200	650	2.000	6.500	20.000	65.000
Vehicle	Typical Traffic Composition (%)								
Car Medium	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%	90,0%
Truck Articulated	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%



## **Anexo B**

**Gráficos Custo vs Irregularidade  
obtidos pelo modelo de custos dos  
utentes da estrada do HDM-4 para as  
situações estudadas**

### A1 - Situação 1: Resultados em termos de CUE a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito pelo modelo

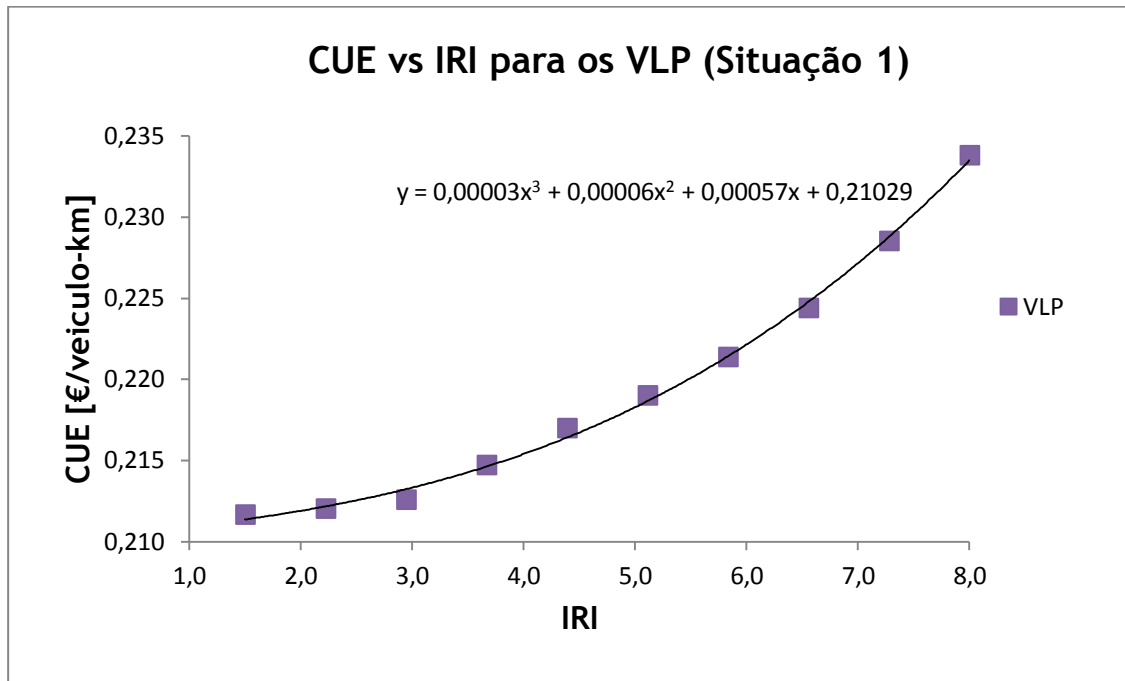


Figura B1 - Relação CUE vs IRI para os VLP obtida pela aplicação da situação 1 do HDM-4

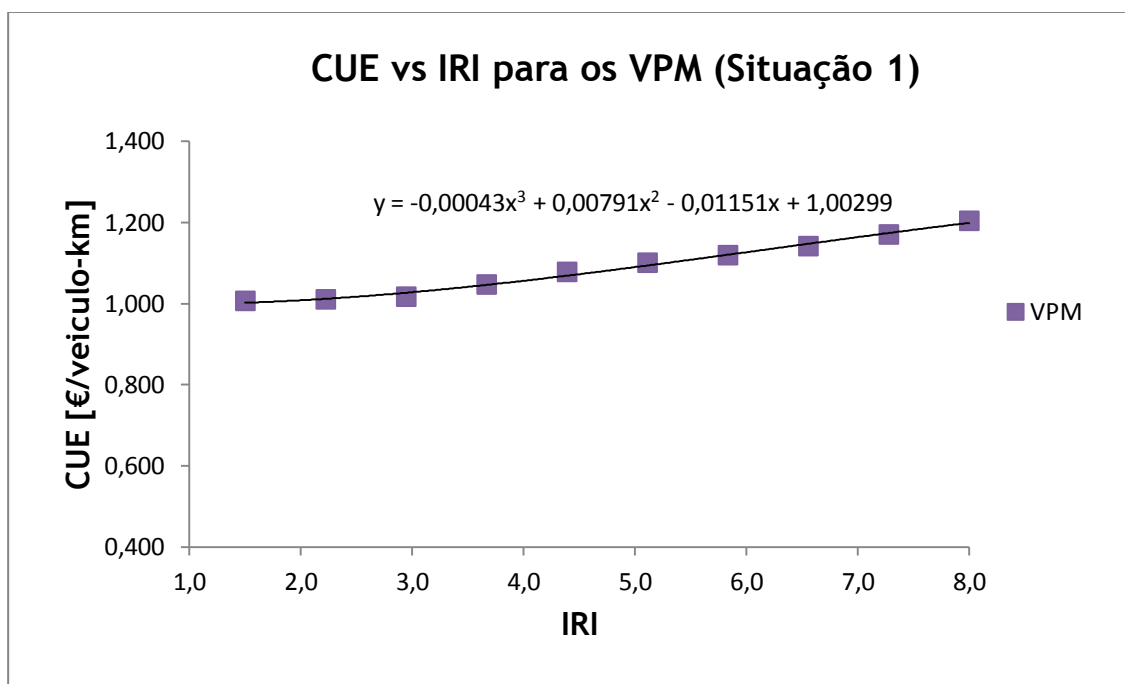


Figura B2 - Relação CUE vs IRI para os VPM obtida pela aplicação da situação 1 do HDM-4

## A2 - Situação 2: Resultados em termos de CUE a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010

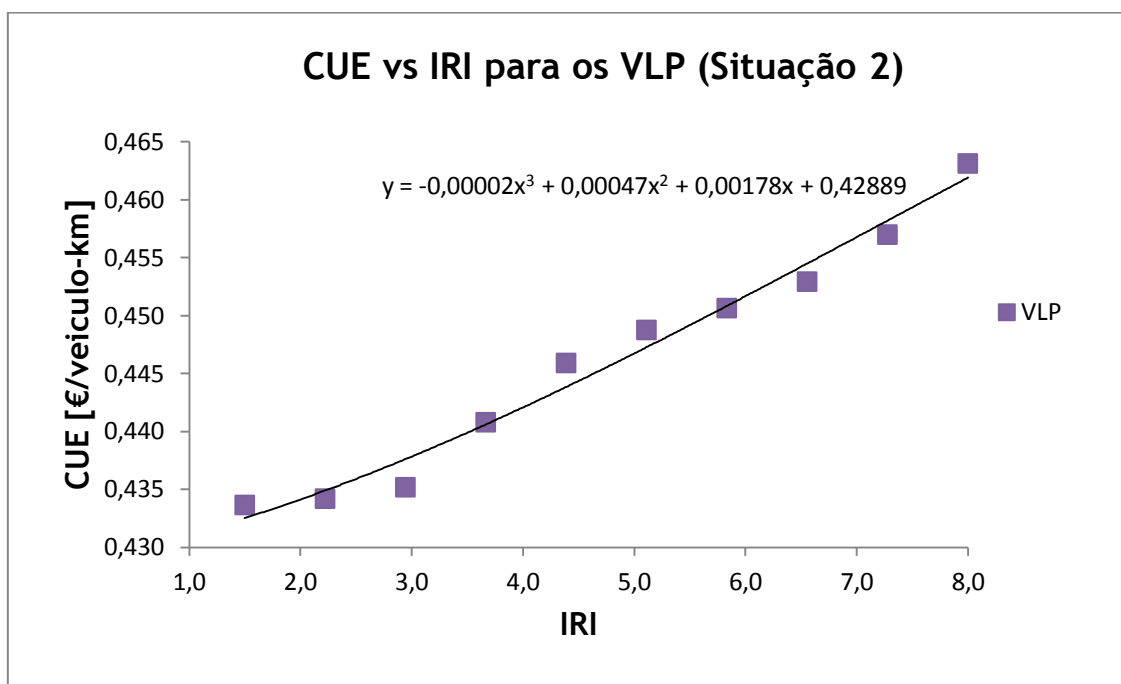


Figura B3 - Relação CUE vs IRI para os VLP obtida pela aplicação da situação 2 do HDM-4

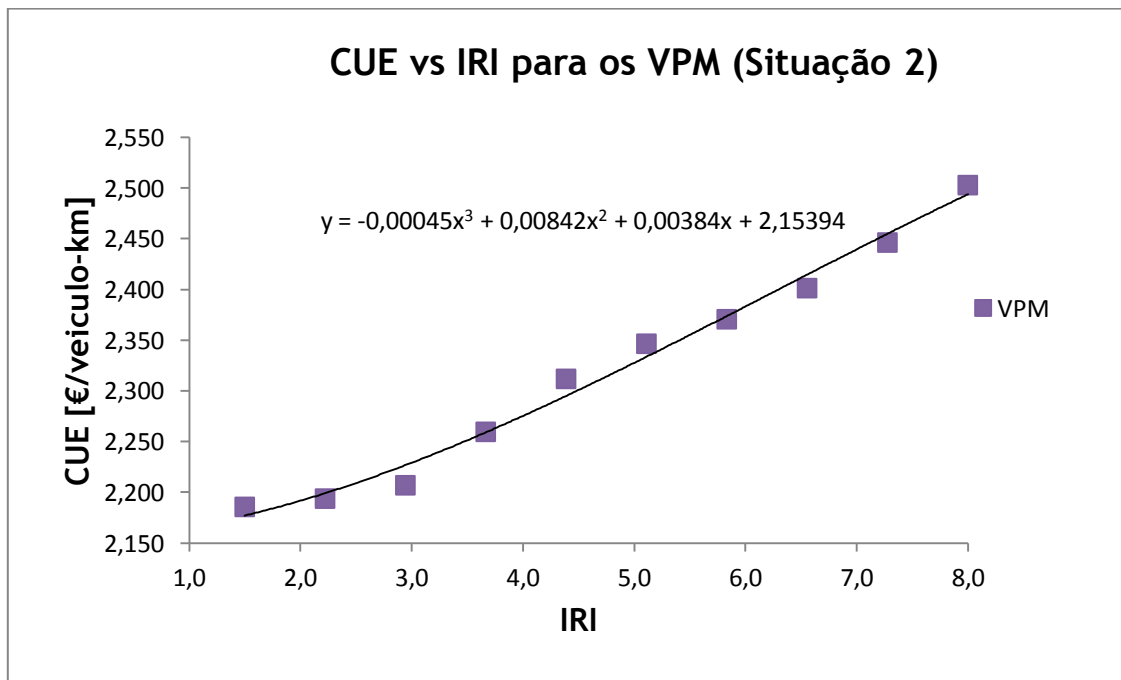


Figura B4 - Relação CUE vs IRI para os VPM obtida pela aplicação da situação 2 do HDM-4

**A3 - Situação 3: Resultados em termos de COV a partir da selecção dos dados de entrada recomendados por defeito pelo modelo, considerando apenas as componentes de COV**

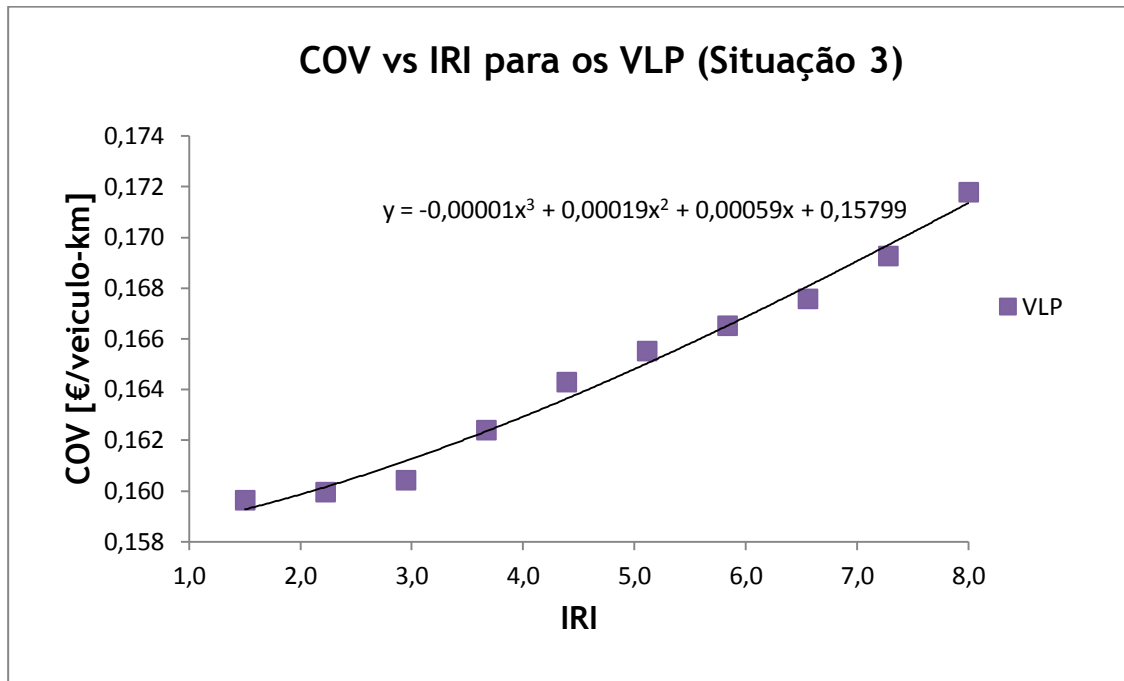


Figura B5 - Relação CUE vs IRI para os VLP obtida pela aplicação da situação 3 do HDM-4

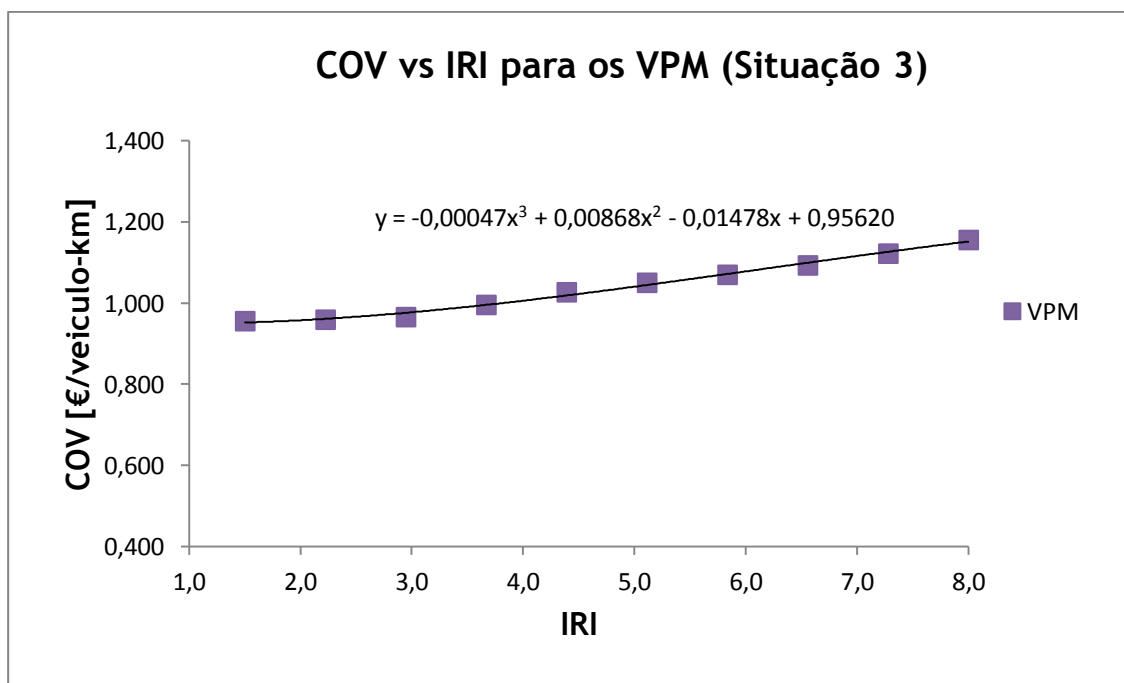


Figura B6 - Relação CUE vs IRI para os VPM obtida pela aplicação da situação 3 do HDM-4

**A4 - Situação 4: Resultados em termos de COV a partir da calibração do modelo com dados portugueses de 2010, considerando apenas as componentes dos COV**

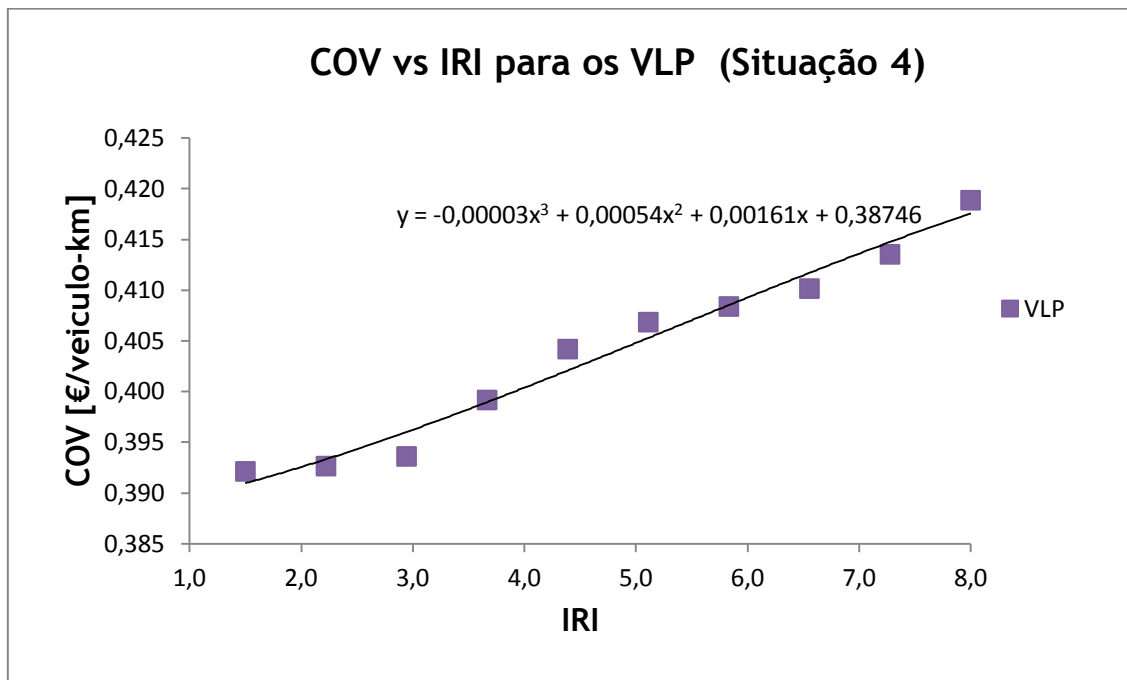


Figura B7 - Relação CUE vs IRI para os VLP obtida pela aplicação da situação 4 do HDM-4

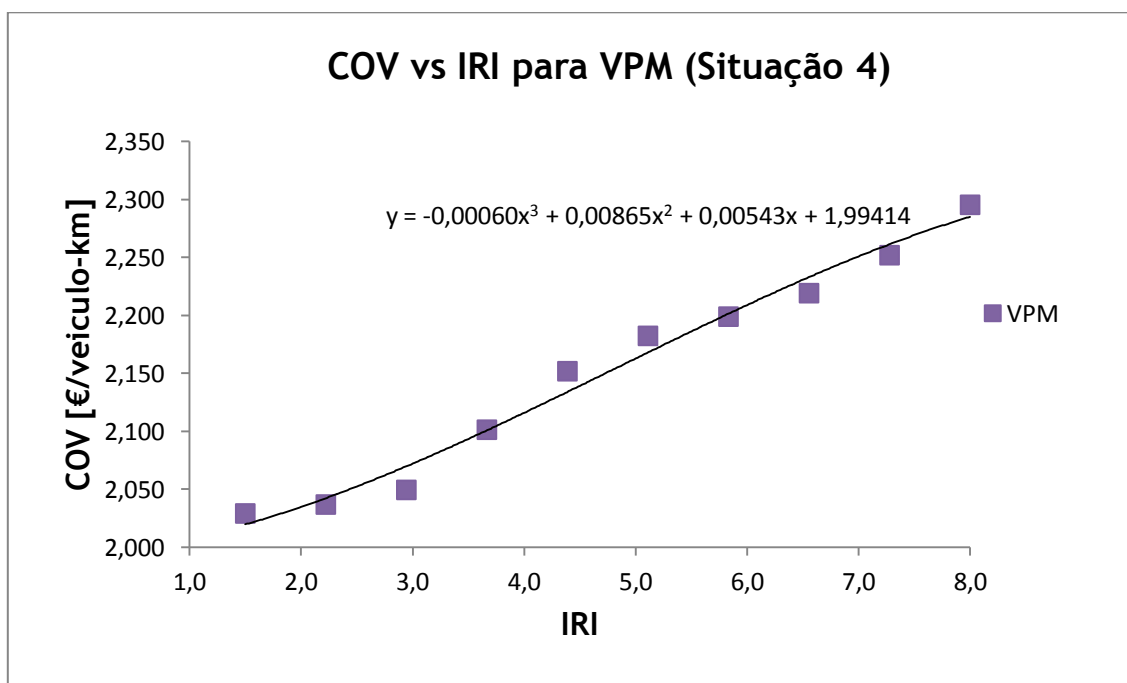


Figura B8 - Relação CUE vs IRI para os VP obtida pela aplicação da situação 4 do HDM-4



## **Anexo C**

# **Cálculo dos Custos Médios dos Utentes da Estrada pelo Modelo Português de CUE para o ano de 2010 - Aplicação à Concessão Scutvias (A23)**

## Determinação do Custo de Operação dos Veículos

Quadro C1 - Determinação do custo do combustível para as diferentes classes de veículos

VLP				VCL			
Repartição do combustível [%/100]	gasolina	Rg	0,5	Repartição do combustível [%/100]	gasolina	Rg	0
	gasóleo	Rd	0,5		gasóleo	Rd	1
Consumo [l/100km]	gasolina	Cgo	5,9	Consumo [l/100km]	gasolina	Cgo	0
	gasóleo	Cd	4,8		gasóleo	Cd	4,5
cc <sub>1</sub> [l/km]			0,0535	cc <sub>2</sub> [l/km]			0,0450
Custo [€/l]	gasolina	PVPg	1,485	Custo [€/l]	gasolina	PVPg	1,485
	gasóleo	PVPd	1,27		gasóleo	PVPd	1,27
Cmc <sub>1</sub> [€/l]			1,378	Cmc <sub>2</sub> [€/l]			1,270
<b><u>Cc<sub>1</sub> [€/km]</u></b>			<b><u>0,0737</u></b>	<b><u>Cc<sub>2</sub> [€/km]</u></b>			<b><u>0,0572</u></b>

VPM				VPP			
Repartição do combustível [%/100]	gasolina	Rg	0	Repartição do combustível [%/100]	gasolina	Rg	0
	gasóleo	Rd	1		gasóleo	Rd	1
Consumo [l/100km]	gasolina	Cgo	0	Consumo [l/100km]	gasolina	Cgo	0
	gasóleo	Cd	44		gasóleo	Cd	36
cc <sub>3</sub> [l/km]			0,4400	cc <sub>4</sub> [l/km]			0,3600
Custo [€/l]	gasolina	PVPg	1,485	Custo [€/l]	gasolina	PVPg	1,485
	gasóleo	PVPd	1,27		gasóleo	PVPd	1,27
Cmc <sub>3</sub> [€/l]			1,270	Cmc <sub>4</sub> [€/l]			1,270
<b><u>Cc<sub>3</sub> [€/km]</u></b>			<b><u>0,5588</u></b>	<b><u>Cc<sub>4</sub> [€/km]</u></b>			<b><u>0,4572</u></b>

Quadro C2 - Determinação do custo dos pneus para as diferentes classes de veículos

VLP		VLP	
np <sub>1</sub>	4	np <sub>2</sub>	4
Cmp <sub>1</sub> [€/pneu]	75	Cmp <sub>2</sub> [€/pneu]	64,5
pvp <sub>1</sub> [km]	40000	pvp <sub>2</sub> [km]	40000
<b><u>Cp<sub>1</sub> [€/km]</u></b>	<b><u>0,0075</u></b>	<b><u>Cp<sub>2</sub> [€/km]</u></b>	<b><u>0,0065</u></b>

VPM		VPP			
np <sub>3</sub>	tractor direcção	2	np <sub>4</sub>	6	
	tractor tracção	4		Cmp <sub>4</sub> [€/pneu]	343,5
	semi-reboque	6		pvp <sub>4</sub> [km]	75000
	total	12		<b><u>Cp<sub>4</sub> [€/km]</u></b>	<b><u>0,0275</u></b>
Cmp <sub>3</sub> [€/pneu]	direcção	490			
	tracção	490			
	semi-reb.	490			
pvp <sub>3</sub> [km]		200000			
<b><u>Cp<sub>3</sub> [€/km]</u></b>		<b><u>0,0294</u></b>			

Quadro C3 - Determinação do custo da manutenção para as diferentes classes de veículos

VLP		VCL	
Cmmt <sub>1</sub> [€]	1625	Cmmt <sub>2</sub> [€]	1920
pvv <sub>1</sub> [anos]	10	pvv <sub>2</sub> [anos]	8
kma <sub>1</sub> [km/ano]	20000	kma <sub>2</sub> [km/ano]	30000
<b>Cm<sub>1</sub> [€/km]</b>	<b>0,0081</b>	<b>Cm<sub>2</sub> [€/km]</b>	<b>0,0080</b>

VPM		VPP	
Cmmt <sub>3</sub> [€]	28920	Cmmt <sub>4</sub> [€]	16835
pvv <sub>3</sub> [anos]	12	pvv <sub>4</sub> [anos]	12
kma <sub>3</sub> [km/ano]	85000	kma <sub>4</sub> [km/ano]	70000
<b>Cm<sub>3</sub> [€/km]</b>	<b>0,0284</b>	<b>Cm<sub>4</sub> [€/km]</b>	<b>0,0200</b>

Quadro C4 - Determinação do custo da desvalorização para as diferentes classes de veículos

VLP		VCL	
Cmdt <sub>1</sub> [€]	17720	Cmdt <sub>2</sub> [€]	11930
pvv <sub>1</sub> [anos]	10	pvv <sub>2</sub> [anos]	8
kma <sub>1</sub> [km/ano]	20000	kma <sub>2</sub> [km/ano]	30000
<b>Cd<sub>1</sub> [€/km]</b>	<b>0,0886</b>	<b>Cd<sub>2</sub> [€/km]</b>	<b>0,0497</b>

VPM		VPP	
Cmdt <sub>3</sub> [€]	87135	Cmdt <sub>4</sub> [€]	223405
pvv <sub>3</sub> [anos]	12	pvv <sub>4</sub> [anos]	12
kma <sub>3</sub> [km/ano]	85000	kma <sub>4</sub> [km/ano]	70000
<b>Cd<sub>3</sub> [€/km]</b>	<b>0,0854</b>	<b>Cd<sub>4</sub> [€/km]</b>	<b>0,2660</b>

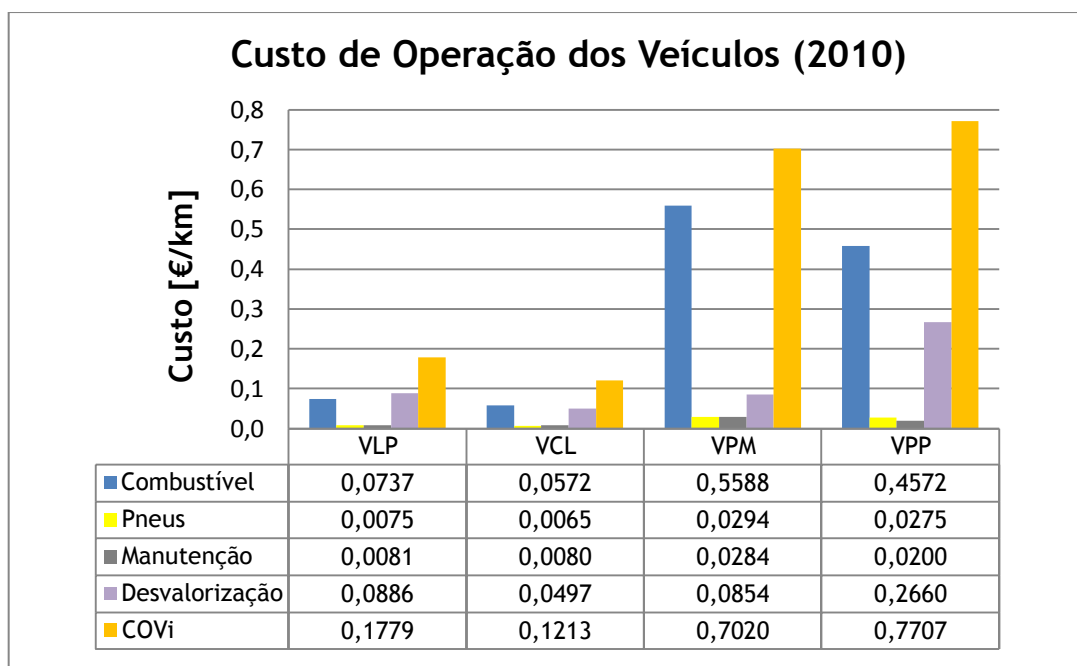


Figura C1 - Custos unitários das componentes de COV e COV final para cada classe de veículo

Após a determinação do COV unitário para cada classe de veículo foi possível determinar o COV final para a rede rodoviária em estudo. O quadro C5 apresenta essa determinação.

Quadro C5 - Determinação do COV final Concessão Scutvias

<b>TMDA [veículos/dia]</b>			10574
(2 sentidos-TMDA total)			
<b>Repartição por classe de veículo</b>			
p <sub>1</sub> [%/100]	VLP		0,7972
p <sub>2</sub> [%/100]	VCL		0,0648
p <sub>3</sub> [%/100]	VPM		0,1289
p <sub>4</sub> [%/100]	VPP		0,0091
<b>COV Scutvias [€/km/dia]</b>			<b><u>2613,90</u></b>

## Determinação do Custo do Tempo de Percurso

Quadro C6 - Determinação do custo unitário do tempo de percurso para as diferentes classes de veículos

VLP			VCL		
CT <sub>1</sub> [€/h]		6,93	CT <sub>1</sub> [€/h]		6,93
CT <sub>2</sub> [€/h]		1,73	CT <sub>2</sub> [€/h]		1,73
TO <sub>1,1</sub>		1	TO <sub>2,1</sub>		1
TO <sub>1,2</sub>		1	TO <sub>2,2</sub>		0
Tipo de itinerário	Velocidade [km/h]	CTP <sub>1</sub> [€/km/veículo]	Tipo de itinerário	Velocidade [km/h]	CTP <sub>2</sub> [€/km/veículo]
EN, ER	70	0,124	EN, ER	70	<u>0,099</u>
IC	80	0,108	IC	80	<u>0,087</u>
IP	90	0,096	IP	90	<u>0,077</u>
<b><u>AE</u></b>	<b><u>120</u></b>	<b><u>0,072</u></b>	<b><u>AE</u></b>	<b><u>120</u></b>	<b><u>0,058</u></b>

VPM			VPP		
CT <sub>1</sub> [€/h]		9,61	CT <sub>1</sub> [€/h]		9,61
CT <sub>2</sub> [€/h]		1,73	CT <sub>2</sub> [€/h]		1,73
TO <sub>3,1</sub>		1	TO <sub>4,1</sub>		1
TO <sub>3,2</sub>		0	TO <sub>4,2</sub>		23
Tipo de itinerário	Velocidade [km/h]	CTP <sub>3</sub> [€/km/veículo]	Tipo de itinerário	Velocidade (km/h)	CTP <sub>4</sub> [€/km/veículo]
EN, ER	50	0,192	EN, ER	50	0,989
IC	60	0,160	IC	70	0,707
IP	80	0,120	IP	85	0,582
<b><u>AE</u></b>	<b><u>100</u></b>	<b><u>0,096</u></b>	<b><u>AE</u></b>	<b><u>110</u></b>	<b><u>0,450</u></b>

Quadro C7 - Determinação do custo do tempo de percurso para a concessão Scutvias

TMDA [veículos/ano]	10574
p <sub>1</sub> [%/100]	0,797
p <sub>2</sub> [%/100]	0,065
p <sub>3</sub> [%/100]	0,129
p <sub>4</sub> [%/100]	0,009
Tipo de itinerário:	<u>AE</u>
CTP <sub>1</sub> [€/km/veículo]	0,072
CTP <sub>2</sub> [€/km/veículo]	0,058
CTP <sub>3</sub> [€/km/veículo]	0,096
CTP <sub>4</sub> [€/km/veículo]	0,450
<u>CTP Scutvias [€/km/dia]</u>	<u>822,30</u>

## Determinação do Custo dos Acidentes

Quadro C8 - Determinação dos custos unitários de acidentes com feridos ligeiros, com feridos graves e com vítimas mortais

ACI. COM FERIDOS LIGEIOS	ACI. COM FERIDOS GRAVES	ACI. COM VÍTIMAS MORTAIS
NAA <sub>1</sub> [acidentes/ano] 59	NAA <sub>2</sub> [acidentes/ano] 10	NAA <sub>3</sub> [acidentes/ano] 2
TMDA [veículos/ano] 10574	TMDA [veículos/ano] 10574	TMDA [veículos/ano] 10574
L [km] 177,5	L [km] 177,5	L [km] 177,5
EA [veículos× km/ano] 685063025	EA [veículos× km/ano] 685063025	EA [veículos× km/ano] 685063025
TS <sub>1</sub> [acidentes/ veículo/km] 8,612E-08	TS <sub>2</sub> [acidentes/ veículo/km] 1,460E-08	TS <sub>3</sub> [acidentes/ veículo/km] 2,919E-09
ca <sub>1</sub> [€/acidente] 75,5	ca <sub>2</sub> [€/acidente] 263,5	ca <sub>3</sub> [€/acidente] 353,5
<u>CA<sub>1</sub></u> <u>[€/km/veículo]</u> <u>6,502E-06</u>	<u>CA<sub>2</sub></u> <u>[€/km/veículo]</u> <u>3,846E-06</u>	<u>CA<sub>3</sub></u> <u>[€/km/veículo]</u> <u>1,032E-06</u>

Quadro C9 - Determinação dos custos unitários das vítimas (feridos ligeiros, feridos graves e vítimas mortais)

FERIDOS LIGEIOS		FERIDOS GRAVES		VÍTIMAS MORTAIS	
TMDA [veículos/ano]	10574	TMDA [veículos/ano]	10574	TMDA [veículos/ano]	10574
L [km]	177,5	L [km]	177,5	L [km]	177,5
EA [veículos× km/ano]	685063025	EA [veículos× km/ano]	685063025	EA [veículos× km/ano]	685063025
TS [acidentes/veículo/km]	1,0364E-07	TS [acidentes/veículo/km]	1,0364E-07	TS [acidentes/veículo/km]	1,0364E-07
NAA [acidentes/ano]	71	NAA [acidentes/ano]	71	NAA [acidentes/ano]	71
NV <sub>1</sub> [vítimas/ano]	88	NV <sub>2</sub> [vítimas/ano]	15	NV <sub>3</sub> [vítimas/ano]	2
NMV <sub>1</sub> [vítimas/acidente]	1,239	NMV <sub>2</sub> [vítimas/acidente]	0,211	NMV <sub>3</sub> [vítimas/acidente]	0,028
cv <sub>1</sub> [€/vítima]	40000	cv <sub>2</sub> [€/vítima]	90000	cv <sub>3</sub> [€/vítima]	500000
<u>CV<sub>1</sub></u> [€/km/veículo]	<u>0,00514</u>	<u>CV<sub>2</sub></u> [€/km/veículo]	<u>0,00197</u>	<u>CV<sub>3</sub></u> [€/km/veículo]	<u>0,00146</u>

Quadro C10 - Determinação do custo dos acidentes final aplicado ao troço da A23

CUSTO DOS ACIDENTES POR TIPO		CUSTO DAS VÍTIMAS POR TIPO		CUSTO DOS ACIDENTES	
CA <sub>1</sub> [€/km/veículo]	6,50232E-06	CV <sub>1</sub> [€/km/veículo]	0,00514	TMDA [veículos/ano]	10574
CA <sub>2</sub> [€/km/veículo]	3,84636E-06	CV <sub>2</sub> [€/km/veículo]	0,00197	<u>CA Scutvias</u> [€/km/veículo]	<u>0,00858</u>
CA <sub>3</sub> [€/km/veículo]	1,03202E-06	CV <sub>3</sub> [€/km/veículo]	0,00146	<u>CA Scutvias</u> [€/km/dia]	<u>90,72</u>
ΣCA [€/km/veículo]	1,138E-05	ΣCV [€/km/veículo]	0,00857		

## Determinação do Custo de Portagem

Quadro C11 - Custo unitário de portagem para as diferentes classes de veículos

Classe de veículo	cportagem <sub>i</sub> [€/km/veículo]
VLP	0,075
VCL	0,075
VPM	0,185
VPP	0,130

Quadro C12 - Determinação do Custo de Portagem para a concessão Scutvias

TMDA [veículos/ano]	10574
p <sub>1</sub> [%/100]	0,7972
p <sub>2</sub> [%/100]	0,0648
p <sub>3</sub> [%/100]	0,1289
p <sub>4</sub> [%/100]	0,0091
<b>CPortagem1 Scutvias [€/km/dia]</b>	<b><u>948,28</u></b>