



AVALIAÇÃO DO POTENCIAL IMPACTO DE UM SISTEMA INOVADOR DE PAVEMENT ENERGY HARVESTING NA SEGURANÇA RODOVIÁRIA

MÁRCIA ALEXANDRA DA SILVA VALE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientadora: Professora Doutora Sara Maria Pinho Ferreira

Coorientador: Doutor Francisco João Anastácio Duarte

JUNHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais e Irmã

Não basta conquistar a sabedoria, é preciso usá-la

Cícero

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer à professora Doutora Sara Maria Pinho Ferreira pela sua orientação científica em relação aos temas abordados e pela sua disponibilidade e preocupação para que a elaboração desta dissertação corresse da melhor forma. Quero também agradecer todas as suas opiniões e sugestões imprescindíveis para o enriquecimento deste trabalho.

Um especial agradecimento ao Doutor Francisco João Anastácio Duarte por todo o seu apoio ao longo deste semestre, pela disponibilidade, por todas as recomendações e observações realizadas durante este período e pela preocupação com a elaboração e sucesso desta dissertação. Um especial obrigado pela oportunidade de pertencer à sua empresa, tornando-se numa mais valia para o futuro profissional.

À minha irmã, Filipa Vale, pelo seu apoio e companheirismo incansável e por todas as brincadeiras, conversas e todos os momentos de descontração que de alguma forma contribuíram para o meu bem-estar.

Aos meus pais pelo apoio ao longo da minha formação académica e por tornarem possível alcançar esta fase na minha vida.

Aos meus amigos pela amizade e por todos os momentos partilhados e por estarem sempre presentes a ajudar seja qual for a dificuldade.

E por último um obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração desta dissertação e para o meu crescimento a nível pessoal.

RESUMO

Nesta dissertação pretende-se avaliar o impacto de um sistema inovador de *Pavement Energy Harvesting* (PEH) na segurança rodoviária. Este consiste numa medida de acalmia de tráfego que pretende trazer um maior número de benefícios em relação às medidas tradicionais, nomeadamente em relação aos desnivelamentos verticais. Para isto, é necessário conhecer bem os sistemas de redução de velocidade, em particular as lombas redutoras de velocidade (LRV) e os sistemas inovadores que se encontram em desenvolvimento ou já disponíveis em mercado.

Assim sendo, foi necessário realizar uma pesquisa bibliográfica acerca de diversos estudos que envolvessem a análise da eficácia da medida na redução de acidentes e que relatassem de forma detalhada a metodologia utilizada. Nesta dissertação encontra-se resumos de uma seleção de estudos sobre medidas tais como LRV, iluminação pública, marcadores de estrada, sistemas de deteção inteligente de peões ou iluminação inteligente, sinalização luminosa e sinalização luminosa combinada com radares. Além destes estudos onde foi possível obter resultados sobre a eficácia destas medidas, foram também consultadas as metodologias e medidas mencionadas nas plataformas *SafetyCube* e *CMF Clearinghouse*.

De forma a calcular uma estimativa de efetividade para o PEH, ou seja, um coeficiente de redução de acidentes, CRF, (*Crash Reduction Factor*) foi tido em consideração os resultados de eficácia em relação a 3 parâmetros de atuação do sistema: controlo de velocidade, efetuado através da componente do pavimento, sinalização vertical e horizontal com LED e iluminação pública inteligente. Contudo, verificou-se não ser possível considerar no CRF todos estes parâmetros por não existirem estudos de acordo com a metodologia pretendida.

Por fim, foi elaborada uma formulação capaz de estimar de forma simplificada a redução da frequência de acidentes resultante da implementação do PEH. Esta formulação tem presente o efeito de fatores de exposição tais como população, volume de tráfego e uso de transportes públicos.

Com base nestas duas metodologias é possível quantificar de forma distinta o efeito esperado do PEH, sendo relevante no futuro validar e comparar estas propostas aplicando uma metodologia do tipo estudo antes e depois, após a implementação do sistema PEH.

PALAVRAS-CHAVE: *Pavement Energy Harvesting*, Segurança Rodoviária, Medidas de Acalmia de Tráfego, Coeficiente de Redução de Acidentes, Eficácia.

ABSTRACT

This thesis aims to evaluate the impact of an innovative system of Pavement Energy Harvesting (PEH) on road safety. PEH is a traffic calming measure whose purpose is to provide advantages that the traditional measures cannot, especially as far as vertical unevenness is concerned. In order to understand that impact, it is important to be aware of the existing deceleration systems, specially speed bumps (LRV) and the innovative systems under development or already available in the market.

Therefore, it was necessary to conduct a literature search on several studies that analyzed the degree to which this measure was efficient in reducing accidents. These studies also reported in detail the methodology used. This thesis collects summaries from a selection of studies on different measures, such as LRV, public lightning, road studs, pedestrian smart detection systems, smart lighting systems, traffic light systems and traffic light systems combined with radar. Besides these studies, which provided some results on the efficiency of these measures, the methodologies and measures mentioned in the SafetyCube and CMF Clearinghouse platforms were also analyzed.

In order to estimate the efficiency of the PEH - in other words, a Crash Reduction Factor (CRF) -, the efficiency results regarding 3 parameters of system performance were considered: speed control (performed through the pavement), vertical and horizontal traffic signs with LED lights and smart public lighting. However, it was not possible to consider all these parameters on the CRF because there were no studies in compliance with the required methodology.

Lastly, a methodology was created, capable of estimating in a simplified manner the reduction of crash frequency as a result of the implementation of the PEH. This methodology covers the effect of exposure factors like population, traffic volume and public transport use.

Based on these two methodologies it is possible to distinctly quantify the expected effect of the PEH. In the future, nevertheless, it is important to validate and compare these proposals using a before and after study-based methodology, after the implementation of the PEH system.

KEYWORDS: Pavement Energy Harvesting, Road safety, Traffic calming measures, Crash reduction factor, Efficiency.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	i
ABSTRACT	iii

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. FUNDAMENTOS E ENQUADRAMENTO DO TEMA 1

1.2. OBJETIVOS 3

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 3

2. ENQUADRAMENTO 5

2.1. SINISTRALIDADE 5

2.2. COMPORTAMENTO HUMANO 9

2.3. EXCESSO DE VELOCIDADE 12

2.4. SINALIZAÇÃO EM PORTUGAL 16

3. MEDIDAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO 19

3.1. METODOLOGIA DE ACALMIA DE TRÁFEGO E SUA EFICÁCIA.....19

3.2. MEDIDAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO 23

3.2.1. ESTREITAMENTO DE VIA 24

3.2.2. SINALIZAÇÃO EM ZONAS ESCOLARES.....25

3.2.3. ZONAS DE 30 KM/H.....25

3.2.4. REDUÇÃO DO LIMITE DA VELOCIDADE 25

3.2.5. LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEIS.....26

3.2.6. SECÇÕES DE CONTROLO E RADARES 26

3.2.7. LOMBAS REDUTORAS DE VELOCIDADE.....26

3.2.8. IMPLEMENTAÇÃO DE ESQUEMAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO 27

4. SISTEMA DE PEH E SISTEMAS SIMILARES 31

4.1. SISTEMA DE PAVEMENT ENERGY HARVESTING 31

4.2. SISTEMAS DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE.....33

4.2.1. MEDIDAS TRADICIONAIS 33

4.2.2. MEDIDAS INOVADORAS.....36

4.3. ILUMINAÇÃO 48

5. ESTADO DE ARTE DAS METODOLOGIASERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.

6. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO SISTEMA PEH 59

6.1. METODOLOGIA PARA ESTIMAR O CRF DO SISTEMA PEH 59

6.2. METODOLOGIA PARA ESTIMAR A EFICÁCIA DO SISTEMA PEH APÓS IMPLEMENTAÇÃO 65

7. CONCLUSÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS 71

7.1. CONCLUSÕES FINAIS.....71

7.2. PERSPETIVAS FUTURAS.....72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos acidentes por utentes a nível mundial, adaptado de (WHO, 2018a)	1
Figura 2 - Distribuição dos acidentes por utentes a nível europeu, adaptado de (WHO, 2018a).....	2
Figura 3 - Distribuição dos acidentes por utentes a nível nacional, adaptado de (WHO, 2018a)	2
Figura 4- Número de fatalidades por tipo de área e modo de transporte, adaptado de(European Road Safety Observatory, 2018).....	8
Figura 5- Número de fatalidades por mês e por tipo de utentes da via, adaptado de ((European Road Safety Observatory, 2018).....	8
Figura 6 – Elementos principais para ocorrência de um acidente	9
Figura 7 – Relação existente entre elementos de tráfego e medidas, adaptado de (Bottesini e Nodari, 2008).....	10
Figura 8 – Principais causas de acidentes em passadeiras, adaptado de (Mako, 2015).....	11
Figura 9 - Principais causas de acidente nas passadeiras devido ao comportamento do peão, adaptado de (Mako, 2015).....	11
Figura 10 -Abordagem do sistema seguro, adaptado de (WHO, 2013).....	12
Figura 11 - Curvas em forma de S para risco de mortalidade de peões pela velocidade de impacto (Hussain et al., 2019).....	13
Figura 12 – Probabilidade de lesão fatal para um peão num atropelamento (WHO, 2008)	14
Figura 13 - Percentual de veículos vendidos na França que podem circular a mais de 150 km/h (WHO, 2008).....	14
Figura 14 - Ilustração do modelo Power e da relação entre o percentual de alteração na velocidade e o percentual de alteração no número de colisões (WHO, 2008)	15
Figura 15 - Relação entre velocidade de circulação e distância de paragem (WHO, 2008)	16
Figura 16 - Fluxograma para escolher qual a metodologia a utilizar, adaptado de (Frank Gross, 2010)	22
Figura 17 – Evolução do número de mortos ao longo dos anos em Portugal (PORDATA, 2019) ... Erro! Marcador não definido.	
Figura 18 – Sistema de Pavement Energy Harvesting da Pavnext (Carvalho, 2019)	31
Figura 19 - Caixa de betão e protótipo do PEH (Carvalho, 2019)	32
Figura 20 – Perfil de uma Speed Hump e de uma Speed Bump (Weber, 1998).....	33
Figura 21 – Speed Hump circular e trapezoidal (Silva et al., 2013)	33

Figura 22- Plataforma elevada na Póvoa de Varzim (Google maps)	34
Figura 23- Passagem pedonal elevada (Autor)	34
Figura 24 – Exemplo ilustrativo de uma lombada combinada (Santos, 2014)	35
Figura 25 – Exemplo ilustrativo de uma lombada “almofada” (Officials, 2019)	35
Figura 26 -Sistema Solar Roadway (Hewitt, 2018)	37
Figura 27 - 1 km de estrada na Normandia, França (Golson, 2016)	38
Figura 28 – Volstreet (Solmove, 2017a)	38
Figura 29 – Volstreet (Solmove, 2017b)	39
Figura 30 – Solwalk (Solmove, 2017a)	39
Figura 31 – Aplicação da solução SolaRoad (SolaRoad, 2020).....	40
Figura 32 – Sistema Lybra (Euronews, 2014).....	41
Figura 33 – Pavegen (Pavegen, 2019)	41
Figura 34 – Imagem ilustrativa do sistema Actibump (Edeva, 2017).....	42
Figura 35 -Actibump (Automonitor, 2016)	42
Figura 36 – Tope Inteligente quando os veículos circulam a velocidades legais (TopeInteligente, 2020)	43
Figura 37 - Tope Inteligente quando os veículos excedem as velocidades legais (TopeInteligente, 2020)	43
Figura 38 -Vivadén (ISASTUR, 2013).....	44
Figura 39 – Vivadén (ISASTUR, 2013)	44
Figura 40 – Flex- Drempel (TTS, 2020)	45
Figura 41 – Aplicação do sistema Flex-Drempel (TTS, 2020)	45
Figura 42 -Badén Inteligente de Velocidad (Badennova, 2015)	46
Figura 43 – Efeito da iluminação num ambiente de escuridão (Guimarães, 2018).....	49
Figura 44 – Passadeira com o sistema LightGuard- flashing (Huang et al., 1999)	56
Figura 45 - Sistema de iluminação LED (Patella et al., 2020)	57
Figura 46 - Passadeira antes e após a intervenção (Vignali et al., 2019)	58

Figura 47 – Desenho ilustrativo do sistema PEH (Autor).....	60
Figura 48- Gráfico de redução de velocidade média e CRF	61
Figura 49 – Ilustração do modelo Power e da relação entre o percentual de alteração na velocidade e o percentual de alteração no número de colisões (WHO, 2008)	62
Figura 50 - Gráfico acidentes e volume/capacidade, adaptado de (Zhou e Sisiopiku, 1997).....	66

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 1- Acidentes e Vítimas (ANSR, 2018)	6
Tabela 2 -Acidentes e Vítimas referente aos anos 2018 e 2019 (ANSR, 2019)	6
Tabela 3- Peões vítimas segundo a localização e o tipo de via (ANSR, 2018)	7
Tabela 4 – Critérios para a seleção da metodologia, adaptado de (Frank Gross, 2010)	23
Tabela 5 - Critérios para a seleção da metodologia, adaptado de (Frank Gross, 2010)	23
Tabela 6 - Resumo das medidas e correspondente classificação segundo 2 ferramentas.....	27
Tabela 7 -Tabela síntese dos sistemas inovadores	46
Tabela 8 - Tabela com CMF e CRF das medidas	59
Tabela 9 - Redução do limite e CRF	61
Tabela 10 - Alteração da velocidade média e CRF.....	62
Tabela 11- Relação velocidade e acidente	63
Tabela 12 - Relação velocidade e fatalidade	63
Tabela 13- Resultados da redução de acidentes e fatalidades segundo a iluminação horizontal	63
Tabela 14 – Tabela resumo.....	64
Tabela 15 - Resultados da metodologia de cálculo da eficácia do sistema PEH	64
Tabela 16 - Relação volume de tráfego e acidentes.....	66
Tabela 17 - Tabela exemplo para avaliar a eficácia do sistema PEH.....	67
Tabela 18 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 1.....	68
Tabela 19 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 2.....	68
Tabela 20 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 3.....	69
Tabela 21 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 4.....	69
Tabela 22 -Redução do número de acidentes e dos custos de acidente de acordo com as medidas selecionadas.....	70

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CMF – Crash Modification Factors

LRV – Lombas Redutoras de Velocidade

PEH – Pavement Energy Harvesting

CRF – Crash Reduction Factors

ONU – Organização das Nações Unidas

OMS – Organização Mundial de Saúde

PIB - Produto Interno Bruto

IP – Itinerários Principais

IC – Itinerários Complementares

EN – Estrada Nacional

FHWA – Federal Highway Administration

SPF- Safety Performance Function

CG – Comparison Group

EB – Empirical Bayes

FB – Full Bayes

SRLC – Speed and Red Light Cameras

TRL – Technology Readiness Level

TNO – Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek

BIV – Badén Inteligente de Velocidad

1

INTRODUÇÃO

1.1 FUNDAMENTOS E ENQUADRAMENTO DO TEMA

Segundo o relatório *Global status report on road safety* realizado pela Organização Mundial de Saúde, OMS, publicado no ano 2018, os acidentes rodoviários são a oitava causa de morte no mundo, afetando pessoas de todas as idades. Estes acidentes são responsáveis por mais de 1,35 milhões de mortes por ano e 50 milhões de feridos. Além disso, são a principal causa de morte para crianças e jovens com idades compreendidas entre os 5 e 29 anos.

Nas 3 figuras seguintes está representada a distribuição de acidentes pelos utentes que circulam nas rodovias, a nível mundial, europeu e nacional. Através da observação das mesmas, é possível facilmente verificar que os utentes mais vulneráveis, ciclistas e peões, representam uma grande parte destes acidentes (WHO, 2018a).

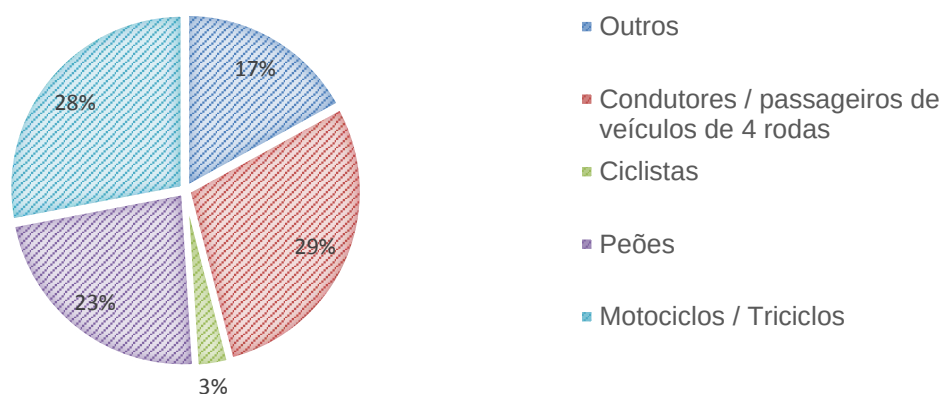


Figura 1 – Distribuição dos acidentes por utentes a nível mundial, adaptado de (WHO, 2018a)

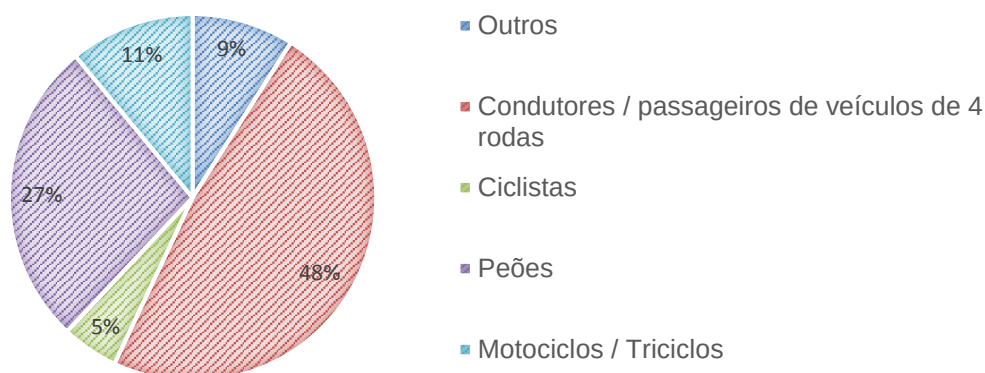


Figura 2 - Distribuição dos acidentes por utentes a nível europeu, adaptado de (WHO, 2018a)

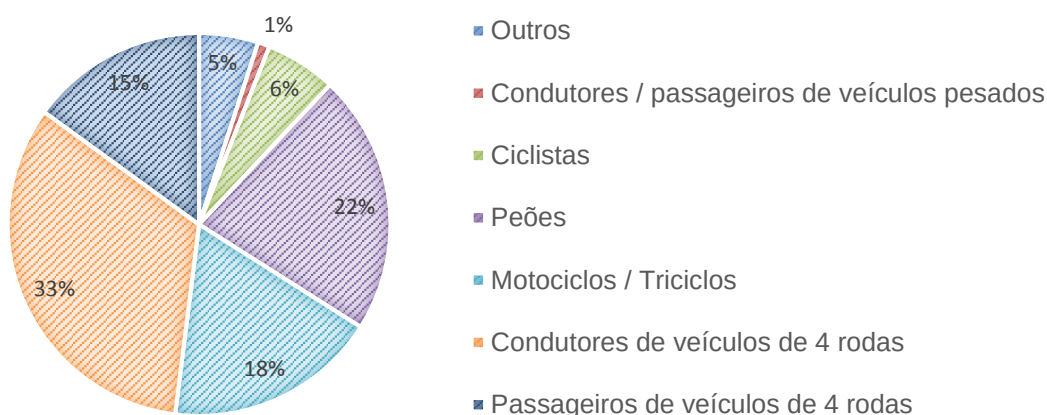


Figura 3 - Distribuição dos acidentes por utentes a nível nacional, adaptado de (WHO, 2018a)

Do ponto de vista socioeconómico, a Organização das Nações Unidas (ONU) sugere que o combate à sinistralidade pela redução da mortalidade rodoviária é uma missão que compete a todos os países, sendo que os acidentes de viação além de serem responsáveis por 1,35 milhões de mortes de pessoas todos os anos também custam à maioria dos países 3% do seu produto interno bruto (PIB) (Gomes, 2020).

A principal causa dos acidentes rodoviários é o excesso de velocidade, uma vez que este aumenta muito o risco de acidente e desempenha um papel determinante em cerca de 30% dos acidentes mortais (Comissão Europeia, 2020). Cerca de 40% a 50% dos condutores ultrapassam o limite de velocidade recomendado e 10% a 20% excedem esse limite em mais de 10 km/h. A velocidade excessiva aumenta a probabilidade de acidente bem como a de ferimentos graves e morte. Contudo não existe uma solução única para este problema. A resposta passa por uma combinação entre uma melhor conceção da infraestrutura rodoviária e a educação dos condutores (Comissão Europeia, 2020).

Com tudo isto, as medidas de acalmia de tráfego são imprescindíveis na segurança rodoviária uma vez que apostam na compatibilização das condições de circulação entre os diferentes modos de deslocação e transporte, promovendo o respeito pela presença dos utilizadores mais vulneráveis (Santos, 2014). Estas medidas têm como objetivo forçar a diminuição da velocidade praticada pelos condutores e em

alguns casos a redução dos volumes de tráfego. Exemplos de algumas medidas de acalmia de tráfego são as lombas, estreitamentos, encerramentos totais ou parciais de vias, radares, entre outros.

A eficácia das medidas de acalmia de tráfego, sendo elas mais tradicionais ou mais inovadoras, vai estar sempre dependente do comportamento humano, uma vez que a falha humana está inerente a uma parte significativa dos acidentes.

As lombas redutoras de velocidade (LRV) são a solução mais frequente para reduzir a velocidade dos condutores, apesar das suas diversas desvantagens. Neste contexto, foi desenvolvido um sistema inovador de redução de velocidade autónomo denominado por *Pavement Energy Harvesting* (PEH).

O PEH consiste num sistema mecânico implementado no pavimento rodoviário capaz de extrair a energia cinética dos veículos, reduzindo a velocidade sem qualquer intervenção do condutor. Além disto, a energia captada é seguidamente convertida em energia elétrica que pode ser utilizada, por exemplo na iluminação do local, que apresenta um impacto bastante positivo na diminuição do número de acidentes. Além destas vantagens, ainda permite a recolha de dados de tráfego e em comparação com as lombas redutoras de velocidade apresenta uma redução da emissão do ruído e do impacto nos veículos.

O PEH posiciona-se no mercado como uma medida de acalmia de tráfego que pretende contribuir para um efetivo decréscimo da sinistralidade rodoviária.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar o potencial impacto de um sistema inovador – *Pavement Energy Harvesting* - na segurança rodoviária, especialmente na redução do número de atropelamentos.

É, portanto, necessário investigar outras soluções, existentes no mercado ou ainda em fase de desenvolvimento, alternativas à analisada no presente estudo, quer sejam as tradicionais, ou inovadoras. Além disso, é necessário ter em conta a eficácia na redução de acidentes das medidas existentes de forma a promover a segurança rodoviária.

Após isto, pretende-se determinar a eficácia do PEH na segurança rodoviária tendo como por base a eficácia das medidas tradicionais, determinadas através de estudos específicos ou do portal online da *CMF Clearinghouse*.

Por último, este estudo tem também como objetivo propor uma metodologia para estimar o efeito do sistema PEH num dado local, comparando o número de acidentes real com o número de acidentes previsto tendo em conta o efeito de fatores de exposição.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento é composto por sete capítulos. O presente capítulo tem como objetivo introduzir a problemática da sinistralidade rodoviária e expor uma solução inovadora capaz de contribuir para

solucionar esse problema, nomeadamente a nível dos atropelamentos. Descreve-se ainda os objetivos a cumprir e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo para além de uma abordagem mais aprofundada da sinistralidade rodoviária, tanto a nível nacional como europeu, é também abordado o comportamento humano uma vez que este é bastante relevante para o decréscimo de acidentes nas estradas. Além disto, também é apresentado um subcapítulo referente a uma das principais causas de acidentes e/ou fatalidade que é o excesso de velocidade. Por fim é apresentado um estudo realizado pela Associação Portuguesa de Sinalização e Segurança Rodoviária, AFESP (2020) onde mostra a importância da sinalização como meio de comunicação entre a infraestrutura e o utente em Portugal.

No terceiro capítulo são apresentadas em detalhe as medidas de acalmia de tráfego tradicionais e a sua eficácia de acordo com o *SafetyCube* e o *CMF Clearinghouse*. Também neste capítulo são abordadas as diferentes metodologias de avaliação da eficácia das medidas.

No quarto capítulo encontra-se uma descrição pormenorizada do sistema PEH e seguidamente a descrição de um sistema tradicional semelhante ao PEH, que são as LRV e de outros sistemas inovadores. Além disto, também é apresentado a importância da iluminação pública na segurança rodoviária uma vez que o sistema PEH pretende gerir iluminação pública inteligente, ou seja apenas se liga quando deteta a presença de um peão.

No capítulo cinco encontra-se uma revisão da literatura de estudos sobre medidas e que consiste num resumo de diversos estudos onde se pretende obter a eficácia de certas medidas na redução do número de acidentes.

No sexto capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para determinar o impacto do sistema PEH. Este capítulo aborda duas metodologias. A primeira pretende obter um coeficiente CRF (*Crash Reduction Factor*) e a segunda pretende estimar a eficácia do PEH pós implementação, tendo em conta alguns fatores de exposição.

No sétimo e último capítulo são dispostas as conclusões resultantes da análise efetuada durante toda a dissertação e serão mencionadas perspetivas futuras.

2

ENQUADRAMENTO

2.1 SINISTRALIDADE

O acidente de viação é considerado genericamente como “um acontecimento fortuito ou eventual que altera a ordem das coisas e que involuntariamente origina danos nas pessoas ou nos objetos” (Machava, 2011).

Segundo a Organização Mundial de Saúde, mais de 1,35 milhões de pessoas morrem todos os anos nas estradas, e entre 20 e 50 milhões sofrem ferimentos não fatais, em que uma boa percentagem destes indivíduos fica com sequelas permanentes. Mais de metade de todas as mortes no trânsito estão entre os utentes mais vulneráveis: peões, ciclistas e motociclistas. (WHO, 2018b).

Segundo Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR) e pela observação da tabela seguinte, no ano 2018 ocorreram 34.235 acidentes com vítimas, dos quais 468 resultaram em acidentes com mortos e 2.337 em acidentes com mortos ou feridos graves. Também foi calculado o índice de gravidade para o mesmo ano onde se obteve o valor de 1,5. Este índice corresponde ao número de mortos por 100 acidentes com vítimas. Pela análise da tabela 1, o número de acidentes com vítimas tem vindo a diminuir desde 2009 até a 2016 e aumentou a partir de 2017. O mesmo acontece para os acidentes com vítimas mortais.

Tabela 1- Acidentes e Vítimas (ANSR, 2018)

Anos	Acidentes com vítimas	Acidentes c/ vítimas mortais e/ou f. graves	Acidentes c/ vítimas mortais	Vítimas mortais	Feridos graves	Feridos leves	Total de feridos	Índice de gravidade
2009	35.484	2.777	673	737	2.624	43.790	46.414	2,1
2010	35.426	2.802	674	741	2.637	43.924	46.561	2,1
2011	32.541	2.641	636	689	2.436	39.726	42.162	2,1
2012	29.867	2.264	525	573	2.060	36.190	38.250	1,9
2013	30.339	2.191	469	518	2.054	36.818	38.872	1,7
2014	30.604	2.317	454	482	2.152	37.019	39.171	1,6
2015	31.953	2.358	438	473	2.250	38.826	41.076	1,5
2016	32.299	2.201	416	445	2.102	39.121	41.223	1,4
2017	34.416	2.397	488	510	2.198	41.787	43.985	1,5
2018	34.235	2.337	468	508	2.141	41.356	43.497	1,5

De acordo com a mesma fonte, no ano 2019, o número de vítimas mortais correspondeu a 472, havendo ainda 2.288 feridos graves. Desta forma, fazendo uma pequena comparação com o ano anterior é possível verificar que houve um ligeiro acréscimo (cerca de 6,9%) em relação aos feridos graves, contudo o número de vítimas mortais foi menor em aproximadamente 7,1%. Do ano 2018 para o ano 2019, o número de feridos leves aumentou de 41.356 para 42.925. Para além destes valores, ainda não existe muita informação referente a este ano (ANSR, 2019).

Tabela 2 -Acidentes e Vítimas referente aos anos 2018 e 2019 (ANSR, 2019)

Ano	Acidentes	Vítimas Mortais	Feridos Graves	Feridos Leves
2018	132.399	508	2.141	41.356
2019	135.063	472	2.288	42.925

Um fator importante de salientar é a localização dos acidentes, nomeadamente dentro ou fora das localidades. De acordo com os dados referentes a 2018, último ano para o qual há dados publicados em Portugal com esta informação específica, o maior número de sinistros acontece dentro das localidades, apresentando um total de 26.513 acidentes com vítimas (77,5% do total) dos quais 243 (0,9%) destes resultaram em vítimas mortais e 1.346 (5,1%) em feridos graves. O índice de gravidade dentro das localidades corresponde a 0,9 e é menor que o índice de gravidade fora das localidades que apresenta um valor correspondente a 3,4. Esta diferença deve-se essencialmente ao número de acidentes com vítimas que é bastante elevado dentro das localidades. Apesar de ser fora das localidades que os veículos circulam a velocidades superiores é dentro destas que circulam os utentes da via mais vulneráveis: peões e ciclistas.

A partir da observação da tabela 3 referente aos peões vítimas de acidentes, como seria de esperar a maioria destes acontecem dentro das localidades perfazendo um total de 80 (1,5%) vítimas mortais e 397 (7,2%) feridos graves, para o ano 2018. Em comparação com o ano anterior é possível averiguar que o número de vítimas mortais e feridos graves aumentou 19,4% e 3,1% respetivamente (ANSR, 2018). Desta forma é imprescindível a implementação de medidas e ações de forma a diminuir os atropelamentos existentes.

Tabela 3- Peões vítimas segundo a localização e o tipo de via (ANSR, 2018)

		Vítimas Mortais		Feridos Graves		Feridos Leves		Total de Vítimas	
		2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
Dentro da Localidade	Arruamento	42	62	323	349	4570	4600	4935	5011
	Estrada Municipal	2	1	1	1	6	7	9	9
	Estrada Nacional	18	14	41	32	282	262	341	308
	IP/IC	3	2	13	8	95	55	111	65
	Outra Via	2	1	7	7	87	77	96	85
	TOTAL	67	80	385	397	5040	5001	5492	5478
Fora da Localidade	Autoestrada	1	6	7	2	8	22	16	30
	Estrada Municipal	9	5	9	6	7	9	25	20
	Estrada Nacional	9	13	19	15	52	53	80	81
	IP/IC	3	1	6	8	18	20	27	29
	Outra Via	3	0	0	3	8	11	11	14
	TOTAL	25	25	41	34	93	115	159	174
TOTAL		92	105	426	431	5133	5116	5651	5652

A nível europeu, e segundo o *European Road Safety Observatory*, no ano 2016 houve um total de 25.792 fatalidades (morte no prazo de 30 dias após o acidente de viação), dos quais aproximadamente 24% foram mulheres e 73% homens, sendo como tal estes últimos os mais sujeitos a acidentes.

O mesmo documento indica que do total de fatalidades, 5.527 dessas fatalidades correspondem a peões sendo os idosos com idade superior a 65 anos os mais suscetíveis. De acordo com a figura 4, é possível comprovar o que foi referido anteriormente e acrescentar que as zonas onde a maioria dos acidentes acontece é na área urbana, ou seja, dentro das localidades, idêntico à situação em Portugal.

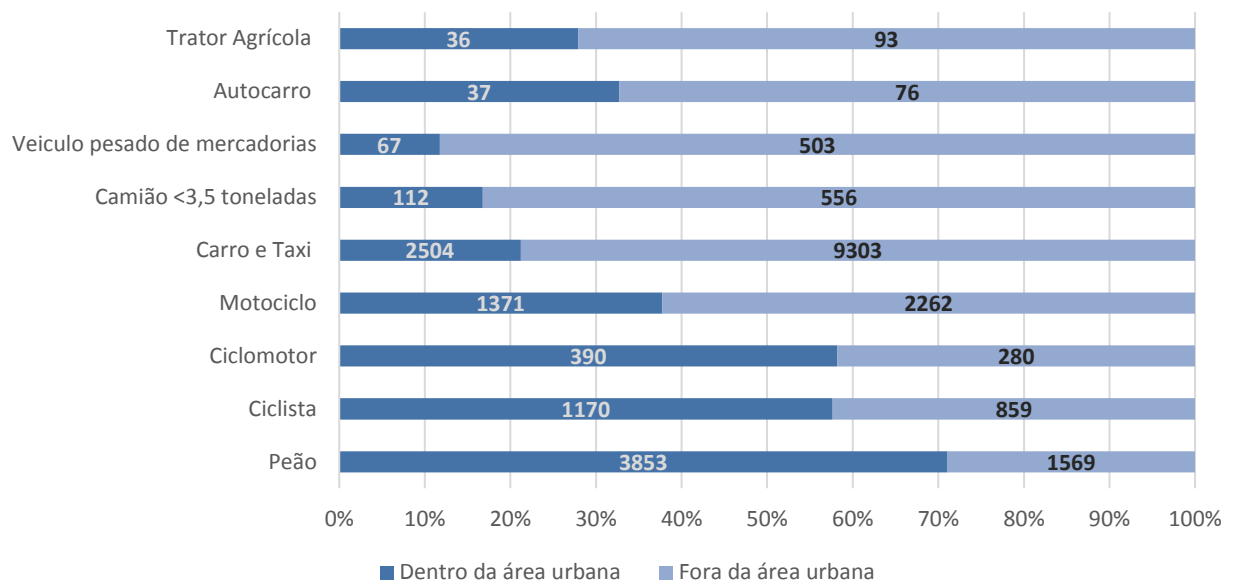


Figura 4- Número de fatalidades por tipo de área e modo de transporte, adaptado de(European Road Safety Observatory, 2018)

A partir da figura 5 é possível apurar quais os meses do ano onde os peões e os condutores apresentam maior ocorrência de acidentes com vítimas, mostrando que a maior incidência de acidentes com peões ocorre entre os meses de outubro a fevereiro (outono/inverno) e para os condutores, contrariamente aos peões, ocorre entre os meses de março a setembro (primavera/verão).

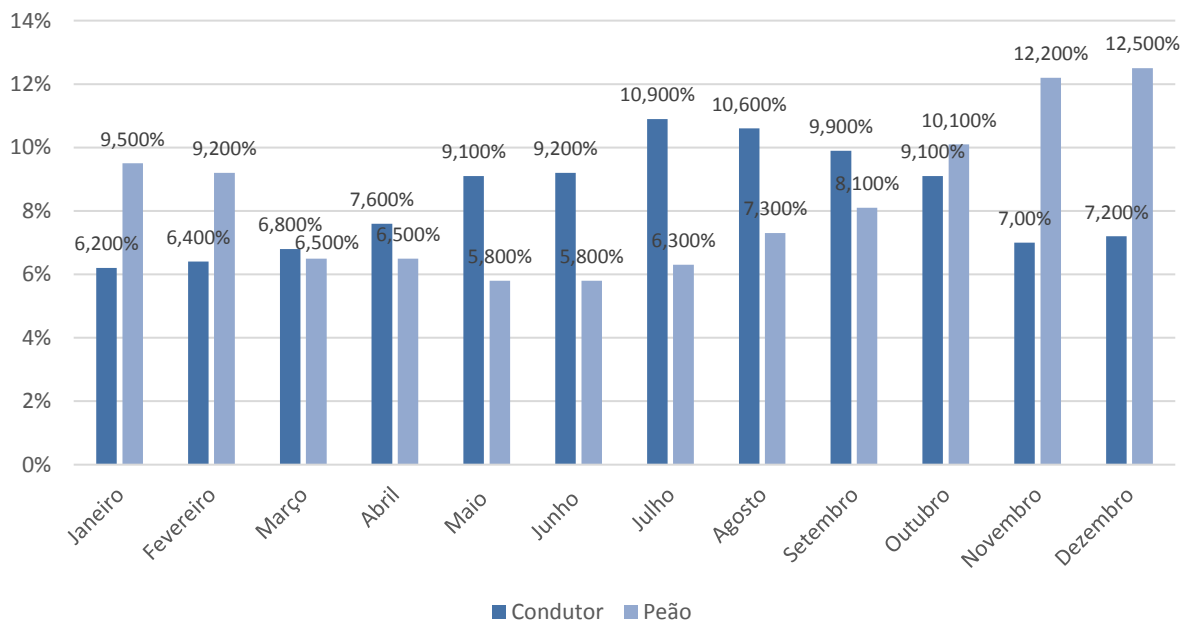


Figura 5- Número de fatalidades por mês e por tipo de utentes da via, adaptado de ((European Road Safety Observatory, 2018)

Segundo o *Annual Accident Report* de 2018, 37% dos acidentes com vítimas ocorre na área urbana, 8% nas autoestradas, 53% fora das áreas urbanas e a restante percentagem é em zonas desconhecidas (European Road Safety Observatory, 2018).

Com o objetivo de melhor entender a realidade dos números acima apresentados torna-se necessário conhecer o sistema rodoviário bem como o seu elemento fundamental: o fator humano.

2.2 COMPORTAMENTO HUMANO

Atualmente a condução é considerada uma atividade trivial, porém a circulação rodoviária é um sistema complexo e os condutores têm de ser capazes de conduzir sem colocar em perigo a sua segurança e a dos demais utilizadores da via. Existem 3 fatores ou elementos que podem contribuir para a ocorrência de um acidente rodoviário: via, veículo e Homem tal como mostra a figura seguinte.

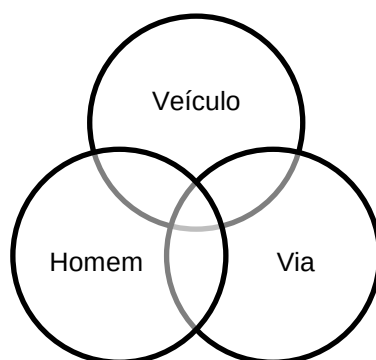


Figura 6 – Elementos principais para ocorrência de um acidente

A qualidade das vias, nomeadamente a sinalização das mesmas, e o estado dos veículos têm uma grande influência nas causas dos acidentes. Contudo, são os comportamentos dos condutores que constituem o fator mais responsável pelos elevados índices de sinistralidade. Cerca de 95% dos acidentes rodoviários são provocados pela falha humana e assim sendo, o comportamento dos condutores deve ser modificado de maneira a minimizar significativamente o número de acidentes. O condutor deve adaptar o seu conhecimento às características geométricas e físicas da via, às condições ambientais e de trânsito. Segundo um estudo realizado a um grupo focal as ultrapassagens indevidas foram consideradas como sendo a principal causa de acidentes, seguida do excesso de velocidade, embriaguez e desrespeito à distância de segurança sendo que as duas últimas ficaram empatadas em terceiro lugar (Bottesini e Nodari, 2008).

Os acidentes ocorrem quando há uma falha em algum dos 3 elementos mencionados anteriormente (via, veículo e Homem) ou na sua interação. Como forma de interferir nestes elementos e tornar o sistema mais seguro é possível adotar medidas relativas a 3 níveis: educação, engenharia e fiscalização (Bottesini e Nodari, 2008). Howarth e Gunn (1982), afirmam que “a educação, a engenharia e a lei constituem abordagens complementares e não alternativas”. Adotar apenas uma destas abordagens é geralmente menos eficaz sendo necessário uma combinação de medidas para abordar de forma mais abrangente os riscos para peões em diferentes contextos (WHO, 2013).

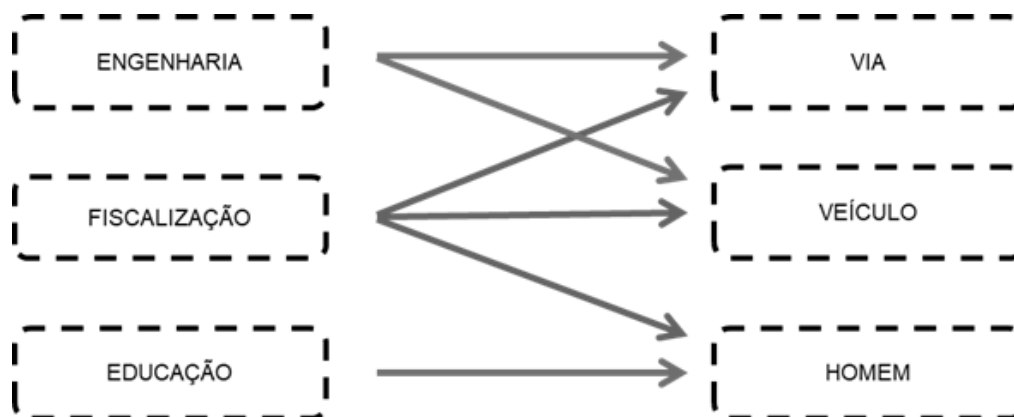


Figura 7 – Relação existente entre elementos de tráfego e medidas, adaptado de (Bottesini e Nodari, 2008)

Sendo o peão caracterizado pela sua imprevisibilidade, mas também vulnerabilidade, o desenho urbano deve condicionar e facilitar a previsão dos seus comportamentos. Por exemplo, um projeto de uma estrada pode aumentar ou diminuir o risco de tráfego de peões através da presença ou ausência de instalações para estes, como calçadas e travessias sinalizadas (WHO, 2013). No entanto, estes utilizadores da via pública têm direitos e deveres e também depende do seu comportamento a possibilidade de reduzir o número de acidentes devido a erros de falha humana (Coelho, 2011). Por exemplo, segundo Champman et al. (1982), os peões adultos geralmente atravessam a rua na diagonal e estão atentos a uma abertura no fluxo do trânsito enquanto caminham pelo passeio e costumam chegar-se à berma quando se apercebem de uma oportunidade. Muitas vezes começam a atravessar enquanto um veículo ainda está a passar ou a aproximar-se para melhor aproveitarem a oportunidade. Por vezes atravessam uma rua congestionada em duas ou mais fases ou em ziguezague. Ocasionalmente, quando o trânsito está denso, mas ainda em movimento, andam uma distância curta pelo meio da via. Já para as crianças verificou-se que devido à sua baixa estatura não são facilmente visíveis para os condutores e segundo Sandels (1975) e outros, as crianças têm uma relativa dificuldade em identificar a direção do som, e a visão periférica é muito menos utilizada pelas crianças do que pelos adultos (Chapman et al., 1982).

De acordo com um estudo realizado na Polónia, 30% dos acidentes com peões ocorrem em passadeiras não sinalizadas e cujo risco de morte aumenta em 37% com o aumento de 10km/h do limite de velocidade. Dessa forma o estudo conclui que o nível de segurança nas passadeiras depende do comportamento dos utentes da via e do respeito pelas regras de trânsito referentes a peões e condutores (Olszewski et al., 2015).

Segundo outro estudo referente a acidentes com peões na Hungria, os dois principais erros dos condutores nas passadeiras foram o excesso de velocidade e a não cedência de passagem dos peões (Mako, 2015).

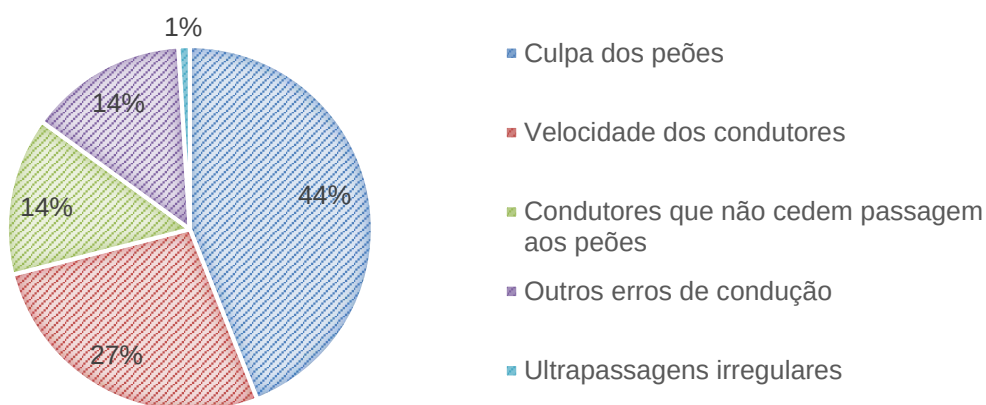


Figura 8 – Principais causas de acidentes em passeadeiras, adaptado de (Mako, 2015)

De acordo com o mesmo estudo, o erro mais frequente cometido pelos peões corresponde à ausência de precauções no atravessamento da rodovia, contemplando 67% dos acidentes. Todavia, este número é erróneo uma vez que, teoricamente, os peões têm prioridade de passagem mesmo em caso de atravessamento descuidado (Mako, 2015).

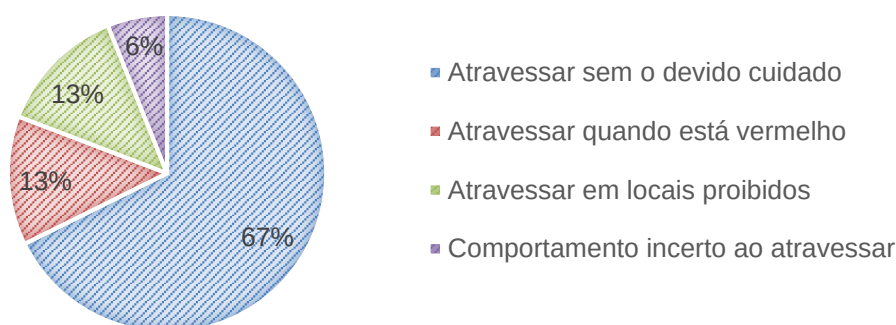


Figura 9 - Principais causas de acidente nas passeadeiras devido ao comportamento do peão, adaptado de (Mako, 2015)

A abordagem do Sistema Seguro fornece uma estrutura viável e abrangente para examinar os fatores de risco de peões e desenvolver intervenções integradas que abordem os utentes, veículos e ambiente rodoviário permitindo maximizar a segurança dos peões. Foi demonstrado que esta abordagem é eficaz em vários locais do mundo, em alguns casos facilitando ganhos na segurança onde novos progressos mostraram ser um desafio. A abordagem do Sistema Seguro à segurança rodoviária reconhece que o transporte é importante para a sociedade e acrescenta que as viagens devem ser seguras para todos os utentes das rodovias. O objetivo deste sistema é a eliminação de acidentes fatais e a redução de ferimentos graves por meio da provisão de um sistema de transporte seguro que perdoa erros humanos e tem em conta a vulnerabilidade das pessoas a ferimentos graves. Isto é possível a partir de um foco na infraestrutura rodoviária, veículo e velocidades de circulação, apoiados por atividades de educação, mudança comportamental, regulamentação, execução e multas (WHO, 2013).

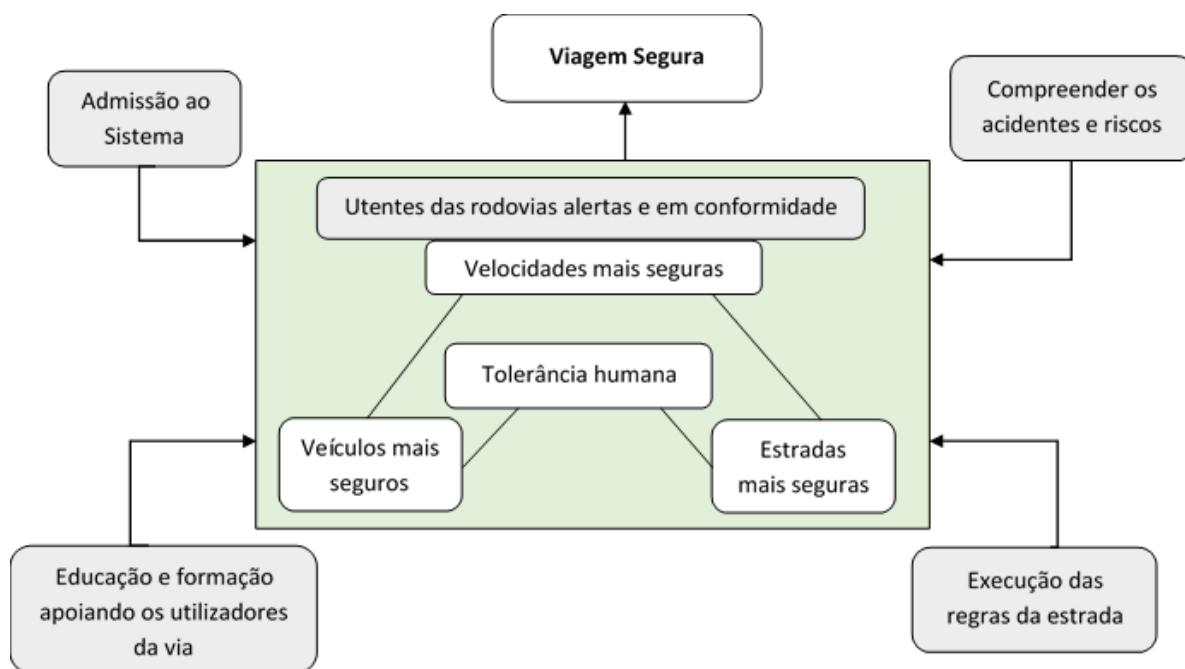


Figura 10 -Abordagem do sistema seguro, adaptado de (WHO, 2013)

Segundo o manual *Pedestrian Safety*, os principais fatores que influenciam o risco de lesões no trânsito de peões e que está em concordância com a abordagem de sistema seguro são a velocidade, álcool, falta de instalações para peões nos projetos de estradas, visibilidade inadequada dos peões e a aplicação inadequada das leis de trânsito. Destes fatores destaca-se a seguir a velocidade por ter um elevado impacto nos utentes mais vulneráveis e consequentemente ser um fator para o qual se tem vindo a desenvolver diferentes soluções e medidas de atuação, tal como o sistema PEH.

2.3 EXCESSO DE VELOCIDADE

Ao longo dos séculos, a evolução dos sistemas de transporte tem sido avaliada pela sua capacidade de reduzir o tempo de deslocação através das elevadas velocidades que estes podem atingir. A salvaguarda da velocidade desejada passou a constituir-se como uma condição primária, designadamente na avaliação do nível de serviço oferecido pela infraestrutura. Contudo, o tempo veio demonstrar que o aumento da velocidade de operação não trazia só benefícios, tendo as questões de segurança rodoviária e preocupações ambientais exigido a integração de novos critérios na avaliação do desempenho geral da infraestrutura.

Apesar do cenário de evolução da segurança rodoviária em Portugal, particularmente quando inserido no contexto europeu dos últimos 10 anos, ser francamente positivo e promissor, verifica-se que a situação continua a ser preocupante, particularmente no que toca aos espaços urbanos e à defesa dos utilizadores vulneráveis. São as autoridades oficiais que apontam a velocidade de circulação como um dos fatores determinantes quer à explicação da frequência, quer da gravidade dos acidentes, considerando-a, de forma direta ou indireta, a base da maioria dos acidentes em Portugal (Silva, 2012).

O principal benefício do fluxo de tráfego de alta velocidade é que o custo atribuído ao tempo de viagem é reduzido, apesar dos custos de combustível, operacionais e ambientais serem mais elevados. No entanto, essa eventual vantagem pode ser contrariada por um possível aumento no número de acidentes e pelo facto de que as consequentes lesões das vítimas, provavelmente serão mais graves se os acidentes ocorrerem em velocidades mais altas. Segundo os autores (Aljanahi, Rhodes e Metcalfe, 1999), os

acidentes de trânsito são o resultado de diversos fatores, sendo a velocidade excessiva uma das principais causas.

A velocidade é sem dúvida uma variável que influencia e origina acidentes, sobretudo quando os condutores conduzem a velocidades superiores aos limites estabelecidos (excesso de velocidade), ou seja velocidade não adequada de acordo com as características da via, veículo ou condições ambientais (Vaz, 2018).

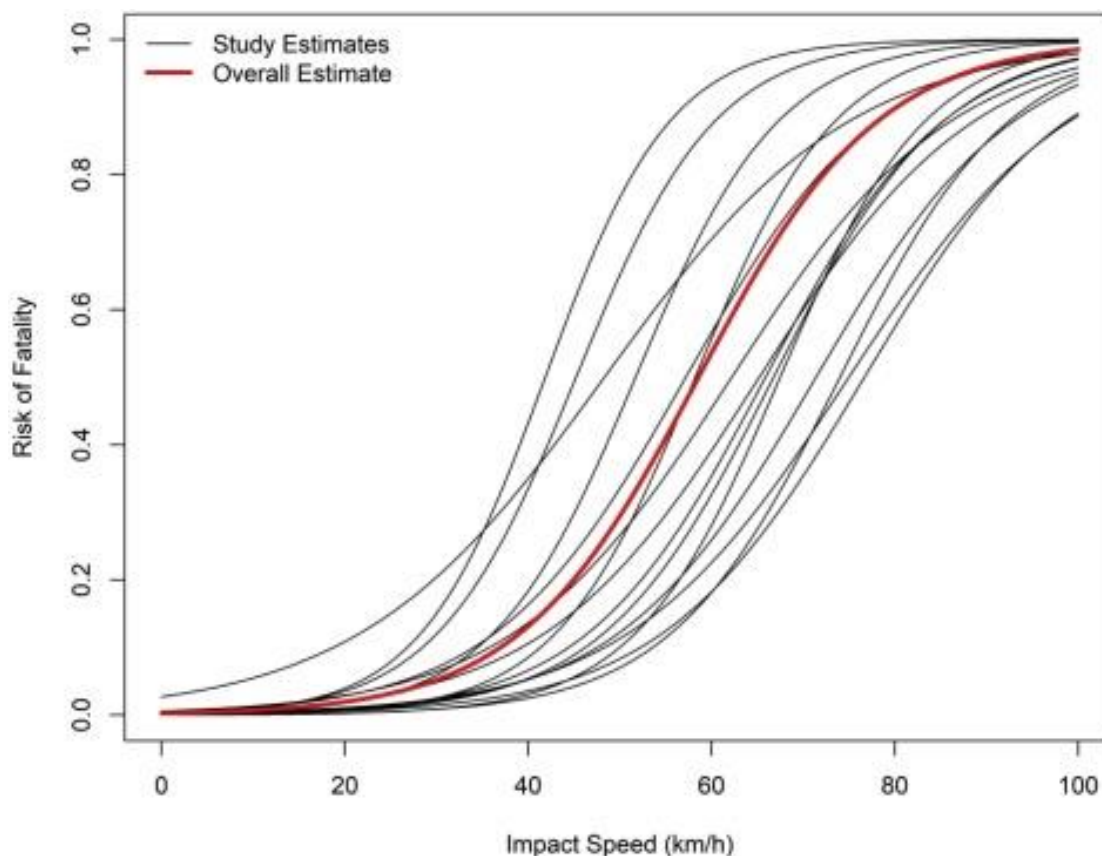


Figura 11 - Curvas em forma de S para risco de mortalidade de peões pela velocidade de impacto (Hussain et al., 2019)

Diversos estudos indicam que, enquanto a maior parte dos utilizadores mais vulneráveis (sem proteção) sobrevive a um atropelamento por um automóvel que circula a 30 km/h, com uma probabilidade de fatalidade entre 5% a 10%, a maioria destes morre quando atropelados por um veículo que circula a 50 km/h. Como mostra a figura seguinte, um peão tem cerca de 80% de probabilidade de ser morto em sequência de uma colisão com um veículo a 50 km/h. Para os ocupantes de um veículo, usar cintos de segurança pode oferecer-lhes proteção até um máximo de 70 km/h em colisões frontais e de 50 km/h na maioria das colisões laterais.

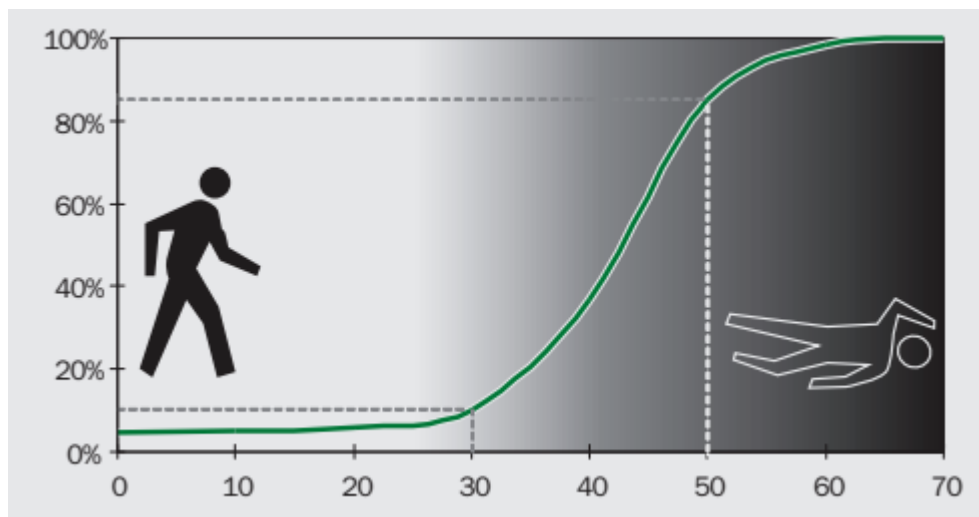


Figura 12 – Probabilidade de lesão fatal para um pedestre num atropelamento (WHO, 2008)

Embora identificar os fatores que contribuem para as colisões no trânsito pode ser um tanto subjetivo, existem estudos que sugerem que até um terço das colisões que resultam em morte envolvem o elemento de excesso de velocidade. Acresce ainda que a velocidade é um fator agravante das consequências em todos os tipos de colisões.

O problema do excesso de velocidade tem aumentado ao longo dos anos, uma vez que a velocidade máxima que os novos veículos podem atingir é, em muitos casos, o dobro do limite de velocidade em áreas rurais. Hoje em dia, muitos veículos modernos podem facilmente exceder os limites de velocidade, o que não era o caso quando os limites de velocidade foram introduzidos pela primeira vez (WHO, 2008).

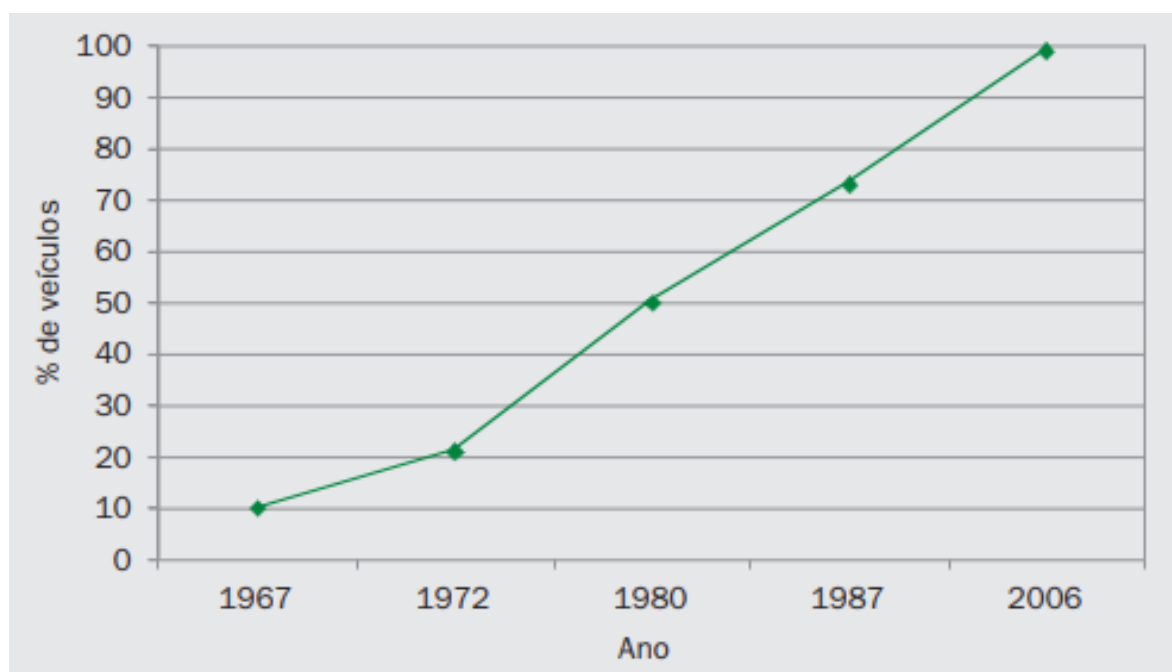


Figura 13 - Percentual de veículos vendidos na França que podem circular a mais de 150 km/h (WHO, 2008)

Existe um conjunto de estudos de investigação em todo o mundo que demonstram claramente a relação entre a velocidade e o risco. Esses estudos indicam que uma velocidade mais elevada aumenta as taxas de colisões, lesões e fatalidades, e que uma velocidade mais baixa reduz essas taxas. Diversos estudos utilizam o modelo *Power* para avaliar os efeitos das alterações na velocidade média sobre a incidência e gravidade das colisões no trânsito. Este modelo sugere que um aumento de 5% na velocidade média leva a um aumento de cerca de 10% nas colisões envolvendo lesões, e um aumento de 20% nas colisões fatais (WHO, 2008).

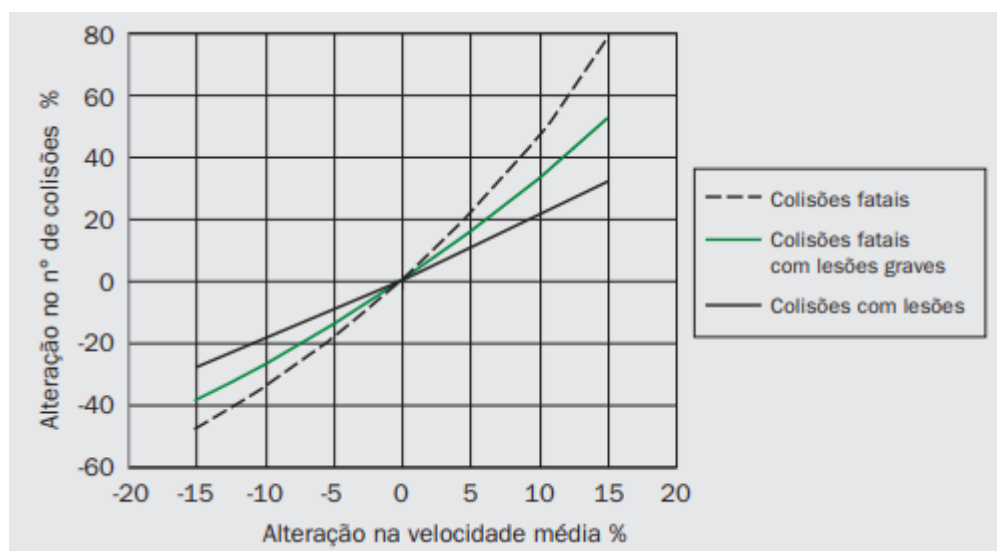


Figura 14 - Ilustração do modelo *Power* e da relação entre o percentual de alteração na velocidade e o percentual de alteração no número de colisões (WHO, 2008)

Aumentar a velocidade do tráfego em apenas 1 km / h pode levar a um aumento de 3% nos acidentes com feridos e a um aumento de 4 a 5% nos acidentes fatais (Tranter, 2010). Outro autor também defende que uma redução de 1 milha/hora, que corresponde aproximadamente a 1,6 km/hora, está associada a uma diminuição de 5% na frequência de acidentes (Taylor, Lynam e Baruya, 2000).

Além disso, importa ter presente que a velocidade afeta de forma significativa o comportamento do condutor através da alteração das suas capacidades visuais e cognitivas. Por exemplo, o campo de visão periférica é substancialmente afetado, assim como a diminuição do tempo disponível para perceber e tratar a informação. À medida que a velocidade de circulação diminui, a visão do condutor é muito mais ampla, permitindo, deste modo evitar alguns acidentes. Para além disto, a velocidade também tem impacto a nível de distâncias de reação e travagem (Silva, 2012).

É evidente que a distância percorrida durante o tempo de reação do condutor e travagem é tanto maior quanto maior for a velocidade de circulação do veículo. A figura 15 mostra as distâncias de reação e travagem, em metros, de acordo com a velocidade de circulação de um veículo. Para 30 km/h, a distância percorrida é de aproximadamente 13 metros. No entanto, para 50 km/h a distância já é substancialmente maior perfazendo um total de 28 metros. Um peão a atravessar a via a uma distância de 15 metros, poderia sobreviver sem qualquer lesão na primeira situação, contudo na segunda já não é provável que assim seja (WHO, 2008).

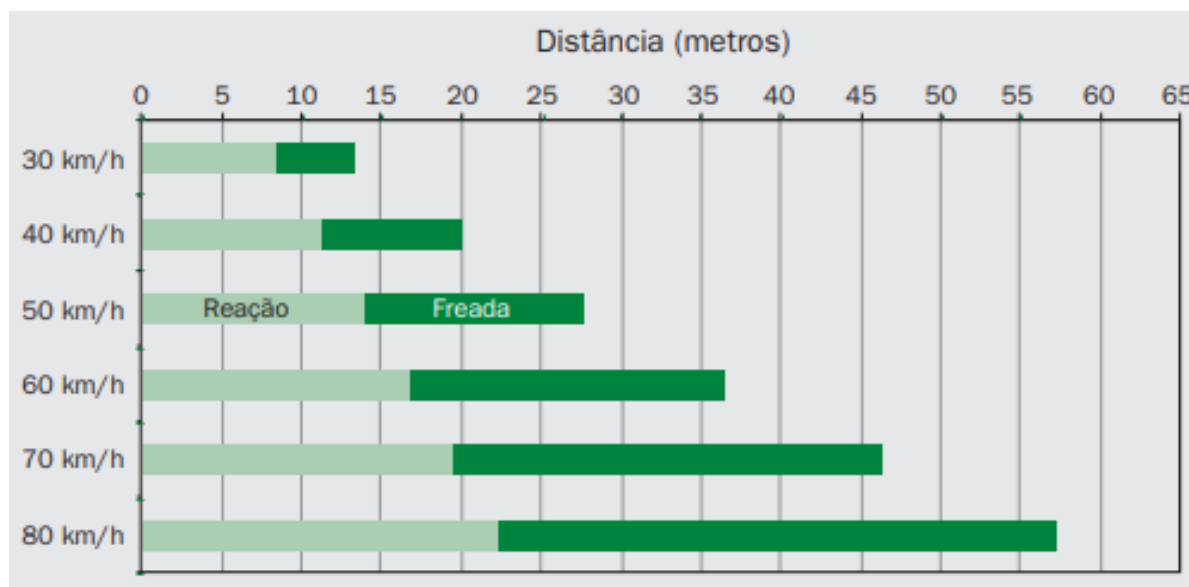


Figura 15 - Relação entre velocidade de circulação e distância de paragem (WHO, 2008)

Como se pode concluir é fundamental atuar na velocidade para melhorar a segurança. A sinalização rodoviária é um elemento de comunicação entre a infraestrutura e os utentes viários. Mas para que essa comunicação seja eficiente é importante conhecer como os utentes a percebem.

2.4 SINALIZAÇÃO EM PORTUGAL

De todos os elementos pertencentes à infraestrutura rodoviária, a sinalização é um dos que mais importância recebe por parte dos utentes das vias devido à sua utilidade na regulação do trânsito e no apoio que oferece aos utentes na compreensão desta, promovendo a segurança rodoviária. Assim sendo, o estudo realizado pela Associação Portuguesa de Sinalização e Segurança Rodoviária (AFESP, 2020) teve como objetivo analisar o quadro da sinalização rodoviária em Portugal, baseando-se, fundamentalmente, na perceção dos utentes da estrada relativamente ao estado da sinalização existente. Para tal, foi realizado um questionário via telefone (no terceiro trimestre de 2019) pela generalidade da população portuguesa no âmbito de retirar conclusões acerca da maturidade da sinalização e da segurança rodoviária em Portugal. Foram sondados 1001 cidadãos portugueses dos 18 distritos de Norte a Sul de Portugal Continental e 2 regiões autónomas (Açores e Madeira). Todos os cidadãos foram considerados como peões e apenas 84% dos inquiridos foram considerados também como condutores, respondendo à totalidade do questionário. Além disto, também foram desenvolvidos workshops, cada um com um público alvo diferente de forma a obter respostas heterogéneas e variadas. Três deles foram direccionados a condutores frequentes de veículos ligeiros, um deles a condutores ocasionais de veículos ligeiros, outro a condutores de motociclos, 2 a peões e o último a condutores de veículos de mobilidade suave (trotinetes ou bicicletas). Além de questionários a condutores de veículos ligeiros ou peões, este estudo também englobou opiniões de condutores mais experientes e com uma visão mais precisa da realidade inerente à sinalização rodoviária em Portugal (condutores de veículos pesados) e opiniões de pessoas que pouco ou nenhum contacto tinham estabelecido com a sinalização rodoviária em Portugal no passado (turistas).

De acordo com os inquéritos realizados foi possível perceber o que os utentes das vias portuguesas valorizam mais e retirar as seguintes conclusões:

- Considerando o inquérito à população, em condições normais de visibilidade, a sinalização vertical é a mais relevante, seguida da sinalização temporária. No entanto, em condições de

visibilidade condicionada, o tipo de sinalização mais importante são as marcas rodoviárias, seguida da sinalização luminosa;

- De acordo com a mesma fonte, a sinalização temporária foi considerada a que apresenta piores condições em termos de quantidade e qualidade, seguida das marcas rodoviárias, sendo a sinalização luminosa a que melhor classificação obteve;
- Genericamente, sob condições de visibilidade reduzida, os utentes sentem menos segurança a atravessar uma passadeira do que de dia;
- Quer os turistas que utilizam a rede rodoviária nacional, quer os condutores de pesados, consideram que o tipo de sinalização que mais deve ser alvo de melhoria são as marcas rodoviárias;
- Apesar da maioria da população considerar que a sinalização rodoviária se encontra visível, 20% considera que a visibilidade da sinalização deve melhorar;
- Nas Estradas Municipais, as marcas rodoviárias e a sinalização vertical são os tipos de sinalização que apresentam pior estado de conservação. No que diz respeito aos IP/IC/EN, as marcas rodoviárias são as que carecem de maiores melhorias em termos de quantidade e qualidade. Já a sinalização luminosa é em todos os tipos de vias, a considerada em melhor estado de conservação.

3

MEDIDAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO

3.1 METODOLOGIA DE ACALMIA DE TRÁFEGO E SUA EFICÁCIA

Este subcapítulo pretende mostrar uma pequena síntese das metodologias existentes e geralmente utilizadas para avaliar o impacto das diferentes medidas de acalmia de tráfego na segurança rodoviária.

A análise da eficiência associada à instalação de diferentes medidas de acalmia de tráfego é uma tarefa difícil, sendo que não há indicadores claros que possam afirmar o benefício de determinada medida, ou até escolher determinada solução em vez de outra. Até porque cada caso tem diversos fatores que consoante o contexto de aplicação podem gerar resultados distintos.

Para avaliar a eficiência de uma medida de acalmia de tráfego existem inúmeras ferramentas desenvolvidas por organizações governamentais. Dessas, destacam-se a SafetyCube DSS e a CMF Clearinghouse (Carvalho, 2019).

O SafetyCube DSS é o sistema Europeu de apoio à decisão em segurança rodoviária, produzido no projeto de investigação europeu SafetyCube, financiado no âmbito do Programa Horizonte 2020 da Comissão Europeia, com o objetivo de apoiar a elaboração de políticas baseadas em evidências. O sistema de suporte à decisão (DSS) SafetyCube fornece informações interativas detalhadas sobre uma grande lista de fatores de risco para acidentes de viação e respetivas medidas para melhoria da segurança rodoviária. O objetivo principal do projeto SafetyCube é desenvolver um sistema de suporte à decisão (DSS) de segurança viária inovador, que permitirá aos decisores de políticas e ações selecionar e implementar as estratégias e medidas mais adequadas e ter em conta uma análise custo-benefício de maneira a reduzir o número de acidentes e as vítimas na Europa e no mundo. O método apresentado nesta plataforma baseia-se no levantamento intensivo do estado da arte de diversos estudos sobre a eficácia de medidas, atribuindo uma classificação ao conjunto dos estudos de cada medida de inconclusiva, provavelmente eficaz ou eficaz.

A segunda ferramenta, CMF (*Crash Modification Factors*) Clearinghouse, provém dos Estados Unidos da América, mais propriamente da Federal Highway Administration (FHWA). *Crash Modification Factors* (CMF), como o próprio nome indica, é usado para calcular o número esperado de colisões após a implementação de uma medida num determinado segmento ou interseção.

De uma forma resumida, este coeficiente pode ser explicado através de um exemplo: uma determinada interseção regista 100 colisões laterais e 500 colisões traseira por ano. Se for aplicado uma medida à qual corresponde um CMF igual a 0,80 para colisões laterais, poder-se-á esperar a ocorrência de 80 colisões laterais por ano após a implementação dessa mesma medida ($100 \times 0,80 = 80$). Se à mesma medida corresponder um CMF de 1,10 para colisões traseiras, esperar-se-á a ocorrência de 550 colisões deste tipo por ano após a implementação dessa medida ($500 \times 1,10 = 550$). De acordo com o exemplo,

é possível constatar que o CMF identifica que uma medida é eficaz quando o valor é inferior a 1 e não eficaz quando superior a 1, pois trata-se de um fator multiplicativo.

O CMF é determinado com base em diferentes estudos que vão sendo desenvolvidos continuamente a partir dos quais se determina o nível de confiança e o desvio padrão associado a cada valor de CMF. Contudo, é de salientar que o CMF é aplicado para cada medida distinguindo-se para a mesma medida o caso de estudo, o tipo de acidente, a zona de colisão, o tipo de utentes envolvidos, a severidade dos feridos envolvidos e mortalidade. Já no SafetyCube sempre que se trata da mesma medida aplicada em análise, os estudos são comparados entre si para dar uma nova classificação final sobre a sua eficácia (Carvalho, 2019).

Para desenvolver um CMF existem vários métodos que podem ser considerados sendo, no entanto, os estudos antes e depois os mais utilizados (Frank Gross, 2010). No caso dos estudos antes e depois, os CMF são estimados a partir da alteração verificada na frequência de acidentes entre o período antes e depois da implementação da medida de tratamento em estudo. Quando não é possível aplicar estudos antes e depois de forma rigorosa e fiável (por falta de casos e dados nos dois períodos em estudo), outros métodos podem ser implementados tais como *cross-sectional*, grupo-controlo, estudo de grupos, meta-análise, painel de especialistas e estudos de indicadores de segurança alternativos (ou indicador proxy). Seguidamente serão enunciados alguns exemplos de estudos descrevendo, de forma resumida, em que consistem, os respetivos pontos fortes e alguns problemas associados. Contudo para uma informação mais detalhada sobre as distintas metodologias sugere-se a leitura dos documentos existentes no portal online do *CMF Clearinghouse*.

O estudo antes e depois com grupo de comparação (*Before-After with Comparison Group Studies*, CG) baseia-se na seleção de um grupo de locais de um conjunto de locais semelhantes para comparação e para os quais foi identificada uma medida de tratamento. Nos locais selecionados para comparação não será implementada a medida, de forma a explicar as alterações no número de acidentes não relacionadas com a medida, como a tendência temporal e volumes de tráfego. Este grupo de comparação é utilizado para calcular a razão da frequência de acidentes observados entre o período antes e depois. A frequência de acidentes observados no período antes no local de tratamento é multiplicada por essa razão de comparação obtendo uma estimativa de acidentes esperados no grupo de tratamento. Seguidamente é comparado essa estimativa com o número de acidentes depois de implementada a medida no local de tratamento e estima-se os efeitos de segurança referentes a essa medida. Este estudo é considerado simples e tem em conta a tendência temporal e as variações no volume de tráfego. Contudo este método não trata o fenómeno de regressão à média que se verifica normalmente na base de acidentes.

O estudo antes e depois empírico *Bayes* (*Empirical Bayes Before-After Studies*, EB) pretende estimar com mais precisão o número de acidentes que teria ocorrido num local no período depois se a medida não tivesse sido implementada. Seguidamente, de forma idêntica à metodologia anterior, é calculado o efeito na segurança de uma dada medida a partir da comparação da soma das estimativas de acidentes com o número observado de acidentes após a implementação da medida. Este método apresenta como vantagem a aplicação de uma função de desempenho de segurança (*safety performance function*, SPF), que contabiliza o fenómeno de regressão à média, o volume de variação de tráfego ao longo do tempo e a tendência temporal. Por outro lado, este estudo considera uma metodologia relativamente complexa que não incluiu conhecimento prévio do tratamento e não é possível considerar a correlação espacial nem aplicar formulações mais complexas de modelos.

Outra metodologia é o estudo *Full Bayes* (*Full Bayes Studies*, FB) que é uma abordagem de modelação para estudos antes e depois ou para estudos de secção cruzada (*cross-section*) quando se verifica ser necessário aplicar modelos complexos ou considerar uma correlação espacial entre locais. Para esta modelação devem ser introduzidas estimativas dos CMF. Esta abordagem apresenta como pontos fortes resultados confiáveis para amostras pequenas e pode incluir conhecimento prévio, correlação espacial e

modelos complexos no processo de avaliação. Em contrapartida, a utilização requer um alto grau de prática do método.

O estudo *Cross-Sectional* analisa as colisões em locais com e sem a característica em estudo e atribui a diferença na segurança à presença dessa característica. O CMF é estimado como a razão entre a frequência média de acidentes nos locais com e sem a característica em questão. No entanto, para que esta abordagem seja válida é importante que todos os locais sejam semelhantes entre si em todos os fatores que afetam o acidente, o que é relativamente difícil de encontrar. Nesta metodologia é possível desenvolver funções CMF e estimar CMF, o que é útil para prever acidentes. Contudo o CMFs podem ser imprecisos.

A metodologia grupo-controlo (*Case-Control Studies*) avalia se a exposição a um potencial tratamento é distribuída desproporcionalmente entre locais e indica o benefício de um dado tratamento. É útil para estudar eventos raros e pode investigar várias medidas por amostra. Por outro lado, só pode investigar uma amostra e não diferencia locais com muitos acidentes daqueles que apresentam menos.

O estudo de grupos (*Cohort Studies*) é utilizado para estimar o risco relativo indicando a variação percentual esperada na probabilidade de um resultado devido a uma alteração unitária no tratamento. Esta metodologia é eficiente para estudar soluções raras uma vez que a amostra é selecionada com base nas condições da solução. Em contrapartida analisa apenas o tempo para o primeiro acidente e requer frequentemente amostras grandes.

O estudo por meta-análise (*Meta-Analysis Studies*) combina diversos conhecimentos sobre CMFs de vários estudos anteriores considerando a qualidade do estudo de maneira sistemática e quantitativa. Pode ser utilizado para desenvolver CMF quando não há dados disponíveis para instalações recentes e apresenta a vantagem de combinar várias jurisdições e diferentes estudos. Assim sendo, requer a identificação de estudos anteriores para uma estratégia específica, procedimentos estatísticos sendo que todos os estudos incluídos devem ser semelhantes.

Em alternativa, o recurso a um painel de especialistas (*Expert Panel*) permite avaliar criteriosamente os resultados de publicações e pesquisas não publicadas. Este estudo pode ser utilizado para desenvolver CMFs quando não há dados disponíveis e não é viável instalar a medida para recolher dados. Além disso pode combinar várias perspetivas não requer processo estatístico formal. Por outro lado, pode haver dificuldades nas interações e dinâmicas do grupo de especialistas.

Por fim, o método de indicadores alternativos ou proxy (*Surrogate Measures*) pode ser utilizado para derivar um CMF quando os dados de sinistralidade são insuficientes ou estão em falta, o que é uma grande vantagem. Em contrapartida não é uma avaliação baseada em acidentes, mas em outros indicadores que se acredita estarem relacionados com a ocorrência de acidentes.

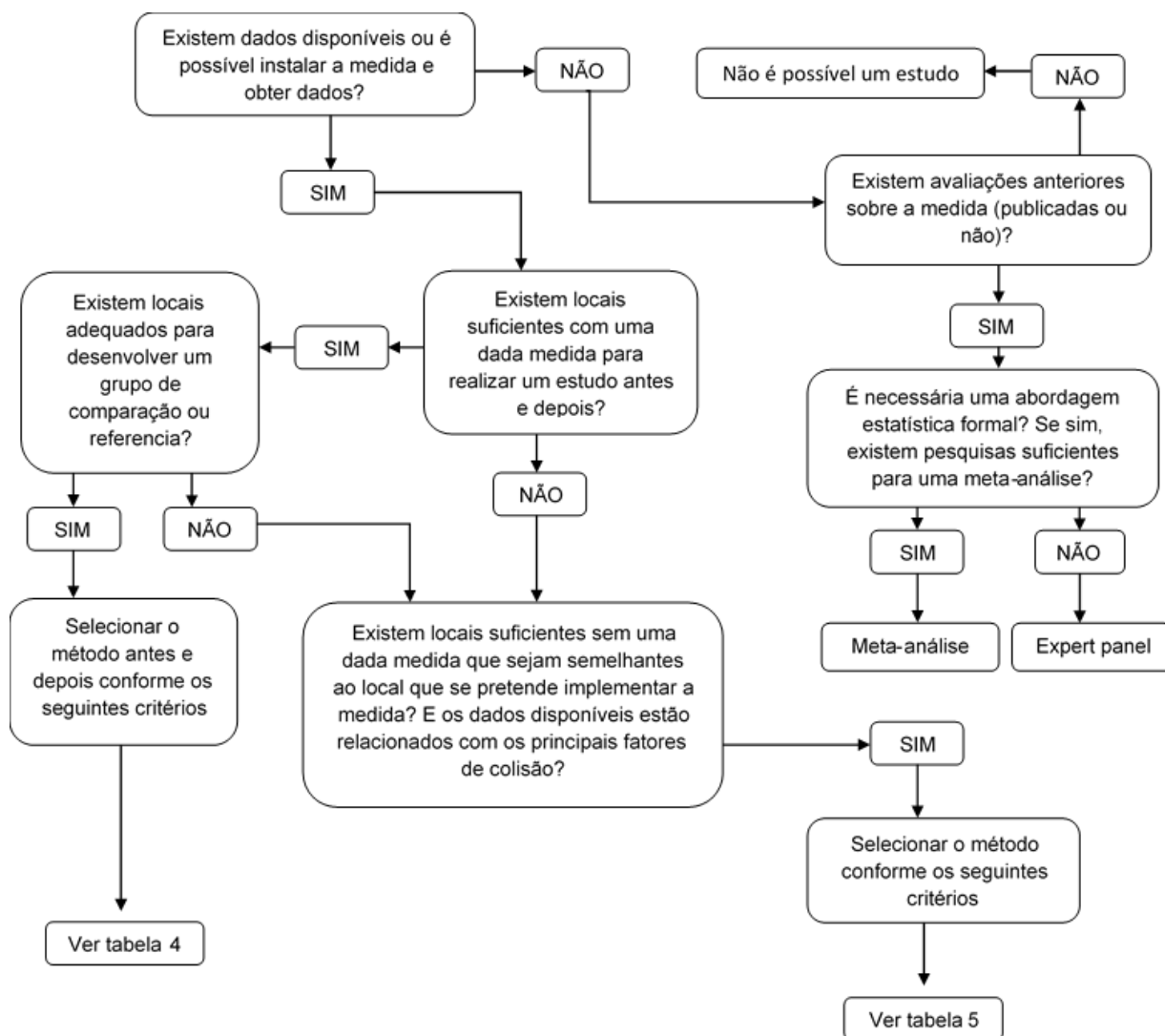


Figura 16 - Fluxograma para escolher qual a metodologia a utilizar, adaptado de (Frank Gross, 2010)

Tabela 4 – Critérios para a seleção da metodologia, adaptado de (Frank Gross, 2010)

Critérios de Estudo	CG	EB	FB
Regressão à média é um fator relevante	Não	Sim	Sim
É provável que a medida tenha impacto no volume de tráfego	Não	Sim	Sim
Inclui correlação espacial	Não	Não	Sim
São necessárias fórmulas de modelos complexos	Não	Não	Sim
Inclui conhecimento prévio da medida ou estimativas do CMF	Não	Não	Sim

Tabela 5 - Critérios para a seleção da metodologia, adaptado de (Frank Gross, 2010)

Critérios de Estudo	Cross Sectional	Case Control	Cohort
Tipo de acidente é raro	Não	Sim	Não
A medida é rara	Não	Não	Sim
Tem em conta locais com acidentes de vários tipos	Sim	Não	Não
Requer função CMF	Sim	Não	Não

3.2 MEDIDAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO

O conceito “acalmia de tráfego” surgiu na Holanda, nos anos 60, com o objetivo de reduzir a velocidade dos veículos e o tráfego de atravessamento em zonas residenciais. Os moradores, irritados com o comportamento dos condutores que atravessavam as localidades a velocidades elevadas durante a noite, foram para a rua e criaram um traçado sinuoso, implementando grandes obstáculos (pedras) de maneira a que os condutores reduzissem a sua velocidade. Foi verificado que tal acontecia e surgiu, assim, o primeiro projeto de acalmia de tráfego (Almeida, 2004).

Os especialistas alemães adotaram o conceito nos anos 70 e no fim da década, a acalmia de tráfego era uma política aceite e com sucesso. O conceito espalhou-se rapidamente à Europa e a muitos países como Dinamarca, Suíça, Grã-Bretanha, Canadá, Japão, Austrália, Nova Zelândia e os Estados Unidos (Almeida, 2004).

A acalmia de tráfego é uma das componentes das estratégias e medidas de planeamento usadas pelas autoridades locais, em conjunto com iniciativas de incentivo ao uso dos sistemas de transportes, fiscalização e restrição do estacionamento, gestão da mobilidade, planeamento do uso do solo, com o objetivo de melhorar a segurança, o ambiente, a atração e a vivência nos centros da cidade e em áreas residenciais. Embora, normalmente, a adoção de técnicas de acalmia de tráfego esteja associada ao meio urbano, estas têm também validade em plenas secções de estrada fora dos perímetros urbanos.

As soluções de acalmia de tráfego caracterizam-se pela implementação de um conjunto de técnicas que alteram a geometria das vias, impulsionando a redução da velocidade dos veículos automóveis, protegendo os utilizadores mais vulneráveis da via – peões e ciclistas (Almeida, 2004).

As medidas de acalmia de tráfego podem ser divididas em 4 grupos:

- Alterações nos alinhamentos horizontais
- Alterações nos alinhamentos verticais
- Encerramentos de via
- Sistemas semaforizados de controlo de velocidade
- Radares

Em relação ao primeiro grupo fazem parte os estrangulamentos, estacionamento ao longo da via, restrições de largura à entrada de interseções, interseção em T modificada, gincanas, medianas e refúgios de peões, desvios de tráfego diagonais/canalizações, portões, rotundas e mini rotundas.

No que diz respeito ao segundo grupo este inclui cruzamentos, plataformas e travessias de peões sobrelevadas, lombas e bandas sonoras/cromáticas.

Os encerramentos de via podem ser parciais com sentidos únicos e proibições de viragem ou até mesmo totais.

3.2.1 ESTREITAMENTO DE VIA

Hadayeghi et al. (2006) avaliaram a eficácia dos estreitamentos de via na segurança rodoviária numa rua residencial no Canadá. O estudo foi concebido com base na metodologia antes e depois com o objetivo de medir os efeitos da implementação de um estreitamento na velocidade média do percentil 85 e o volume médio de tráfego. Estes dois efeitos são estimados para o local de tratamento assim como para grupos de comparação para determinar as mudanças na velocidade e no volume de tráfego sem a implementação desta medida. Os resultados são apresentados para um período anterior (24 horas antes) e dois períodos posteriores (1e 4 meses após) à colocação da medida. Embora tenham sido observadas reduções na velocidade dos veículos na maioria dos intervalos de tempo analisados, nenhum foi considerado estatisticamente significativo. Em analogia com os grupos de comparação, observou-se que as velocidades observadas, após um mês da implementação nos locais tratados foram ligeiramente inferiores às dos locais não tratados, mas que a diferença entre estes dois locais foi muito menor após 4 meses, o que indica que o efeito do estreitamento de via diminuiu. Outro estudo antes e depois foi realizado por Mountain et al. (2005) no Reino Unido de forma a determinar as alterações nas taxas de acidentes e velocidades dos veículos do estreitamento de via. Montella et al. (2011) realizaram um estudo utilizando um simulador de condução que analisou quatro tipos diferentes de estreitamentos de via e sua localização na aproximação de um cruzamento onde as bandas cromáticas/sonoras também estavam presentes. Foram detetadas reduções significativas nas velocidades e desacelerações dos veículos até 250 metros antes do cruzamento. Bella e Silvestri (2015) investigaram o comportamento do condutor na velocidade em travessias de peões com um estudo também em simulador de condução. Foram determinados resultados significativamente positivos em relação à distância inicial que o veículo inicia a travagem e teve um efeito negativo para a velocidade mínima atingida durante a desaceleração. Outro estudo em simulador de condução foi desenvolvido por Hsu e Chuang (2016). Neste caso os autores obtiveram resultados positivos em relação à segurança, ou seja, identificaram maiores distâncias

para o início da desaceleração. Esta medida foi classificada como provavelmente eficaz pelo SafetyCube DSS (Quigley, 2017b). Segundo a classificação CMF Clearinghouse, de acordo com os 10 CMF's calculados nos estudos de Hughes et al. (2010) e Abdel-Aty et al. (2014), estes apresentam valores inferiores a 1 com a exceção de um único estudo que está acima do valor recomendado. Comparando as duas ferramentas, ambas apresentam valores positivos para esta medida encontrando-se de forma geral em concordância.

3.2.2 SINALIZAÇÃO EM ZONAS ESCOLARES

Os estudos de Schrader (1999), Lee et al. (2006) e Kattan et al. (2011) evidenciam que a velocidade nas zonas escolares pode ser reduzida pela aplicação de aparelhos de monitorização de velocidade. Segundo Lazic (2003), com um estudo antes e depois realizado no Canadá, a alteração do limite de velocidade pode reduzir substancialmente a velocidade em zonas escolares, embora se possa verificar a circulação a velocidades acima do limite estabelecido. Os estudos de Schrader (1999) e Simpson (2008) não conseguiram demonstrar que os sinais iluminados ou as marcas no pavimento, respetivamente, podem reduzir a velocidade dos veículos nestas zonas. Já segundo os autores Fitzpatrick et al. (2010) e Kattan et al. (2011) a presença de elementos específicos como passeio, passadeiras e vedações pode contribuir para velocidades mais reduzidas. Esta medida foi classificada como provavelmente eficaz pelo SafetyCube (Goldenbeld, 2017). De acordo com 5 CMF's calculados nos estudos de Guiterrez et al. (2008), a maioria destes (4 em 5) encontram-se próximos da unidade, embora ainda abaixo, o que vai de acordo com a classificação do SafetyCube.

3.2.3 ZONAS DE 30 KM/H

Webster e Layfield (2007), através de um estudo antes e depois realizado no Reino Unido, analisaram o número de acidentes em zonas de limite de velocidade de 30 km/h. Os resultados mostraram que os números de acidentes e vítimas reduziram significativamente com a implementação destas zonas. Lindenmann (2005), a partir de um estudo antes e depois na Suíça, analisou o número de acidentes e a velocidade de circulação dos veículos em zonas de limite de velocidade de 30 km/h. Os resultados mostraram reduções significativas nas taxas de acidentes e em alguns casos também reduções consideráveis nas velocidades de circulação. Contudo, quando as zonas de limite de velocidade de 30km/h não eram acompanhadas por outras medidas físicas adicionais, como sinais ou marcações, não foram encontradas reduções significativas. Um estudo do *Department of Transport and Atkins* (2010) que teve o mesmo objetivo que os estudos anteriormente referidos, evidenciou uma redução na taxa de acidentes e na velocidade média dos veículos. No entanto, nenhuma destas reduções foi significativa. De salientar que o estudo menciona que em locais onde a velocidade média era de aproximadamente 39 km/h, a velocidade média reduziu aproximadamente 12 km/h, sendo neste caso um resultado bastante positivo e significativo. Grundy et al. (2008) analisaram, através de um estudo antes e depois, 399 zonas de 30km/h implementadas em Londres até ao ano de 2006. O estudo constatou reduções nas taxas de acidentes. O *Department of Transport* (2000) obteve a mesma conclusão. No entanto, estes dois estudos não apresentaram nenhuma análise estatística, e como tal não se sabe se os resultados foram significativos. Esta medida foi classificada como eficaz pelo SafetyCube (Quigley, 2017a). Não foi encontrado nenhum valor de CMF para esta medida.

3.2.4 REDUÇÃO DO LIMITE DA VELOCIDADE

De Pauw et al. (2014), Elvik (2013), IRTAD (2017), Islam (2014) e Long et al. (2006) realizaram estudos para avaliar a eficiência da redução do limite de velocidade através de vários tipos de estudos (antes e depois, meta-análise, entre outros). Em geral, todos os estudos concluíram havia existência de uma forte relação entre a redução do limite de velocidade e a segurança rodoviária e nenhum efeito negativo foi encontrado com esta medida, o que permitiu o SafetyCube classificar esta medida como eficaz. A redução do limite de velocidade tem impacto na velocidade média de circulação que diminui

e desta forma, o número de mortos e feridos sofre uma descida drástica (Leblud, 2017). Por outro lado, e de acordo com os 41 CMF's calculados nos estudos de Islam and El- Basyoung (2015), De Pauw et al. (2012), Jaarsma et al. (2011), Abdelany et al. (2014), Parker (1997) e Elvik et al. (2004), a redução do limite de velocidade apresenta vários valores próximos de 1 e mesmo em alguns casos acima deste. Neste caso, verificou-se que apesar desta medida apresentar alguns valores bastante inferiores à unidade, estas situações são escassas e desta forma, estas duas ferramentas apresentam conclusões diferentes para esta medida.

3.2.5 LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEIS

Os autores De Pauw et al. e Lee et al. (2006), através de um estudo antes e depois e de um modelo de microsimulação, respetivamente, avaliaram os efeitos de limites de velocidade variáveis. Os resultados de ambos os autores indicaram que esta medida diminui consideravelmente o número de colisões. O autor Rămă (1999) avaliou a mesma medida concluindo apenas que esta tinha impacto na velocidade média de circulação dos veículos. Embora esta medida ainda não foi largamente estudada, foi avaliada como eficaz pelo SafetyCube uma vez que todos os estudos apontam no sentido favorável da segurança rodoviária (Daniels, 2017). De acordo com apenas um CMF calculado no estudo do autor Bham et al. (2010), esta medida apresenta um valor corresponde a 0,92 o que é bastante próximo de 1 o que significa, mais uma vez, que as duas ferramentas estão em discordância sobre a eficiência desta medida.

3.2.6 SECÇÕES DE CONTROLO E RADARES

Os estudos de Hoyer (2014), Lahrmann et al. (2016) e Montella et al. (2015) evidenciaram que as secções de controlo têm uma influência bastante positiva na segurança rodoviária, nomeadamente na redução drástica do número de acidentes. Os estudos de Hoyer (2015), na Noruega, Hu & McCart (2016), nos Estados Unidos e Li & Graham (2016) no Reino Unido, revelaram que a colocação de radares de controlo de velocidade reduz drasticamente a velocidade de circulação, reduzindo, também, o número de acidentes. Em conclusão, a medida foi avaliada como eficaz pelo SafetyCube uma vez que há uma ampla evidência de que as secções de controlo e radares melhoram a segurança rodoviária (Ceunynck, 2017). De acordo com 78 CMF's calculados nos estudos de Pauw et al. (2014), Novoa (2015) e Hoyer (2015), as secções de controlo e radares apresentam um vasto conjunto de valores de diversas grandezas, salientando-se os valores que se encontram próximos de 1. O somatório dos valores abaixo da unidade perfazem um total de 54 CMF's. A maioria dos valores superiores a 1 pertencem apenas ao estudo de Pauw et al. (2014). Mais uma vez, estas duas ferramentas não estão em concordância, mas pode-se considerar que se aproximam na avaliação da eficácia desta medida.

3.2.7 LOMBAS REDUTORAS DE VELOCIDADE

Hoyer (2015) realizou uma meta-análise de 4 estudos que investigaram os efeitos na segurança rodoviária com a instalação de lombas e concluiu que houve uma significativa diminuição na percentagem de acidentes com a instalação desta medida de cerca de 17%. Contudo, a diminuição de acidentes com peões (1%) ou ciclistas (16%) não foi estatisticamente significativa. Kudryavstev et al. (2012), através de um estudo na Rússia, observaram uma redução significativa na taxa de acidentes entre veículos e peões (atropelamentos) em passadeiras com a instalação de lombas em cruzamentos não sinalizados (redução média mensal de 2,7%). Os autores Agerholm et al. (2015) estudaram, o efeito das lombas na velocidade média dos veículos em várias pequenas cidades da Dinamarca e concluíram que as desacelerações eram realizadas entre 75 a 125 metros antes das lombas. Gitelman et al. (2016), em 8 locais de Israel, mostraram que as passadeiras elevadas em conjunto com as lombas reduziam consideravelmente as velocidades dos veículos. Alguns estudos como Ribeiro (1996) e Cruz (2008) procuraram avaliar o nível de redução da velocidade imposta por um conjunto limitado de lombas ou bandas cromáticas. Desta forma, esta medida foi classificada, segundo o SafetyCube, como eficaz (Quigley, 2017d). De acordo com 2 CMF's calculados num estudo de Elvik et al. (2004), a

implementação de lombas redutoras de velocidade apresenta resultados bastante positivos. Desta forma, esta ferramenta encontra-se em concordância com a classificação do SafetyCube.

3.2.8 IMPLEMENTAÇÃO DE ESQUEMAS DE ACALMIA DE TRÁFEGO

Estes esquemas de acalmia de tráfego são definidos como áreas onde várias medidas de segurança rodoviária são instaladas para ajudar a reduzir a velocidade do tráfego e proteger os utentes vulneráveis da via. Estes podem incluir passadeiras, estreitamentos, mini rotundas, lombas e restrições de velocidades. Normalmente são localizados em áreas residenciais. Hoye (2014), Bunn et al. (2003) e Elvik (2001) realizaram meta-análises de 10, 16 e 33 estudos respetivamente, onde investigaram a segurança da instalação de esquemas de acalmia de tráfego. Os resultados evidenciaram uma diminuição significativa da percentagem de acidentes com danos materiais e acidentes com vítimas. Yannis et al. (2014) realizaram um estudo antes e depois com medidas de engenharia de tráfego de baixo custo. O estudo evidenciou reduções consideráveis nas colisões após a implementação destas medidas. Esta medida foi classificada como provavelmente eficaz pelo SafetyCube (Quigley, 2017c). De acordo com 4 CMF's calculados nos estudos de Elvik, R. and Vaa, T. (2004) todos se encontram próximos e abaixo da unidade o que vai de acordo com a classificação do SafetyCube.

A tabela 6 resume as medidas analisadas e respetivas classificações de acordo com as duas ferramentas consideradas.

Tabela 6 - Resumo das medidas e correspondente classificação segundo 2 ferramentas

Medida	SafetyCube	CMF Clearinghouse	Vantagens	Desvantagens
Implementação de <i>Woonerfs</i> (rua partilhada pelos diversos utentes da via)	Resultados incorretos		Dar prioridade ao peão Quando implementadas logo de origem numa zona nova não tem um custo muito significativo	Quando introduzidas numa zona já existente torna-se numa solução com um custo elevado
Implementação de estreitamentos	Provavelmente eficaz	0,44 – 0,62	Redução da velocidade	Insegurança para os ciclistas devido à diminuição da largura da via
		0,58 – 0,73	Permite maior campo visual para os peões e menor distância de atravessamento	Perda de lugares de estacionamento, logo é uma solução a evitar em zonas de congestionamento
		0,76 – 0,85	Desencoraja a passagem de veículos pesados	e em zonas com

	Implementação de um estreitamento com bandas sonoras em meio urbano controladas por STOP		0,58 – 1,54	Pouco impacto na circulação de veículos de emergência	falta de estacionamentos
Sinalização de zonas escolares		Provavelmente eficaz	0,839 – 1,28		
Implementação de zonas de 30 km/h		Eficaz		Dar prioridade ao peão	
Implementação de esquemas de acalmia de tráfego (mini rotundas, passadeiras, estreitamentos, restrições de velocidade)		Provavelmente eficaz	0,67 – 0,75		
Redução do limite de velocidade	Redução de 10% da velocidade média	Eficaz	0,68 – 0,9	Redução da taxa de acidentes	
	Redução de 15% da velocidade média		0,56 – 0,85		
	Redução de 5% da velocidade média		0,83 – 0,95		
	Redução do limite 50 km/h para 40 km/h		0,501 – 0,821		
	Redução do limite 80 km/h para 60 km/h		0,44 – 0,86		
	Redução do limite 80 km/h para 60 km/h nos cruzamentos		0,53 – 0,56		
	Redução do limite de 90 km/h para 70 km/h		0,64 – 1,11		

Limites de velocidade variáveis (mudam de acordo com o tráfego em tempo real, estrada ou condições climáticas)	Eficaz	0,92	Redução da taxa de acidentes
Instalação de secções de controlo e radares de velocidade	Instalação de radares fixos	0,39 - 1,46	Eficaz na redução instantânea de velocidade, contudo pouco eficaz após a passagem do veículo
Instalação de radares combinados com semáforos	Eficaz	0,72 – 1,61	Obriga a redução da velocidade para não alterar a cor do semáforo Custo de implementação e manutenção relativamente elevado Por vezes pode reter o veículo que cumpre o limite em vez do veículo que não cumpre
Instalação de lombas	Eficaz	0,5 - 0,6	Custo de investimento relativamente baixo Atrasos e potencialização de problemas no transporte urgente de doentes quando a solução é transposta por veículos de emergência Redução da velocidade de circulação Custos de manutenção Redução do volume de tráfego Poluição Sonora Desconforto e danos no Veículo

Apesar da eficácia das medidas e do evidente decréscimo de acidentes nas últimas décadas, a sinistralidade em particular o número de mortos continua a persistir em valores aquém do desejado e contrariando estratégias como Visão Zero. Como tal, o contínuo desenvolvimento de medidas e sua correta implementação é fundamental ainda mais no âmbito do contexto atual das tecnologias bem como do conceito das *Smart Cities*.

4

O SISTEMA DE PEH E SISTEMAS SIMILARES

4.1 SISTEMA DE PAVEMENT ENERGY HARVESTING

O sistema *Pavement Energy Harvesting* desenvolvido pela empresa *Pavnext* consiste num dispositivo a implementar no pavimento rodoviário, que tem como objetivo a extração da energia cinética dos veículos, o que leva a uma redução automática da sua velocidade, sem qualquer ação do condutor (figura 18). A energia captada é depois convertida em energia elétrica com uma elevada eficiência, que pode ser aplicada, por exemplo, na iluminação do local ou alimentação de dispositivos elétricos, como sinalização ou veículos elétricos. Além disso, está previsto a instalação de um armário adjacente ao sistema constituído por baterias que irão armazenar a energia, a qual pode ser utilizada quando necessário.

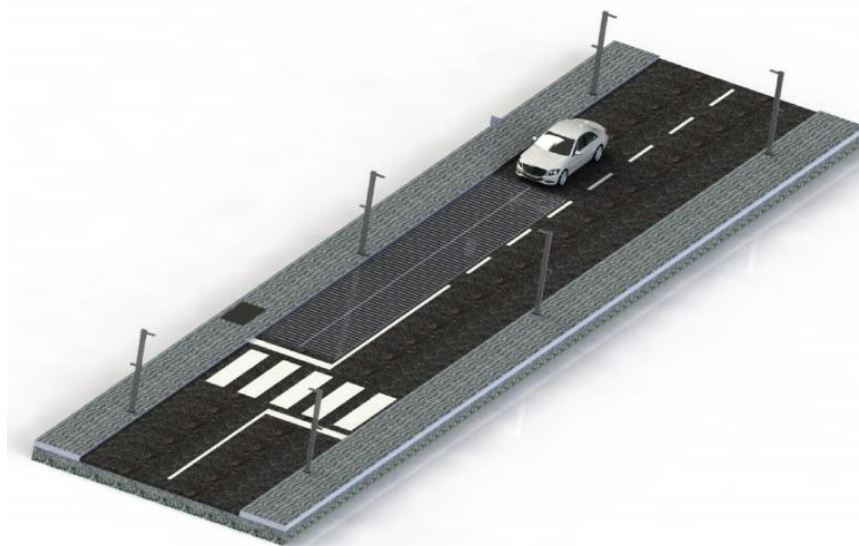


Figura 17 – Sistema de Pavement Energy Harvesting da Pavnext (Carvalho, 2019)

Este sistema inovador será aplicado ao nível da camada superficial do pavimento rodoviário numa caixa de betão, de forma a que este não se encontre em contacto direto com o solo tal como mostra a figura

19. Com isto pretende-se facilitar a drenagem e posicionar corretamente os módulos. Esta tecnologia, é composta por módulos, o que facilita a substituição quando necessária, que perfazerão uma extensão de 20 metros. Na parte central da caixa de betão, denominada por corredor central, é um local estipulado para a passagem dos cabos necessários para a geração e recolha de dados. Este corredor também é o local exato para a passagem dos motociclos sobre o sistema. A partir de sensores e outros componentes eletrónicos, instalados neste local, será possível recolher informações relativas ao tráfego e monitorizar o sistema à distância.

Serão recolhidos dados como:

- Tráfego diário através da contagem de descidas da tampa;
- Peso dos veículos, através da medição da descida da tampa;
- Velocidade dos veículos, comparando o tempo de descida entre tampas;
- Avisos de congestionamento caso muitos módulos estejam a ser pressionados.



Figura 18 - Caixa de betão e protótipo do PEH (Carvalho, 2019)

Este sistema pretende ser mais eficiente que as lombas redutoras de velocidade no que diz respeito ao ruído e ao impacto causado quando os veículos passam sobre elas. Em termos de atuação na segurança, este sistema pretende atuar ao nível do controlo de velocidade através da plataforma instalada no pavimento, mas também através da sinalização vertical e horizontal com led e iluminação pública inteligente, que é garantida pelo próprio sistema através da energia captada e convertida. Ou seja, uma vez que os módulos deste sistema perfazerão uma extensão de 20 metros é possível desta forma reduzir aproximadamente 40% da velocidade dos veículos. Se um veículo circular a 50km/hora, depois de atravessar o sistema a velocidade equivale a 30km/hora. Além disto, a energia gerada pelo sistema permite alimentar os marcadores LED na passadeira de forma inteligente e interativa, aumentando desta forma a segurança rodoviária do local.

O PEH é uma medida que se insere no conceito de cidade mais segura, sustentável e inteligente.

4.2 SISTEMAS DE REDUÇÃO DE VELOCIDADE

4.2.1 MEDIDAS TRADICIONAIS

A medida tradicional que mais se assemelha com o sistema inovador *Pavement Energy Harvesting* são as Lombas Redutoras de Velocidade (LRV). Estas consistem numa secção elevada da faixa de rodagem construída em toda a sua largura apresentando um caráter não temporário, dimensionada com o objetivo de causar desconforto crescente nos ocupantes dos veículos durante o seu atravessamento com o aumento da velocidade. Tal efeito, porém, não é significativo para velocidades de valor igual ou inferior ao recomendado e, nestes casos, não pode provocar dano nos veículos (Silva, 2012).

As LRV podem distinguir-se em 2 grupos dependendo do seu comprimento e elevação. De acordo com a figura 20, as *Speed Hump* apresentam um comprimento de 3 a 12 metros e uma elevação entre os 5 e 12 centímetros. Já as *Speed Bump* apresentam um comprimento entre os 0,3 e 1 metro e uma elevação entre os 5 e 15 centímetros (Weber, 1998).

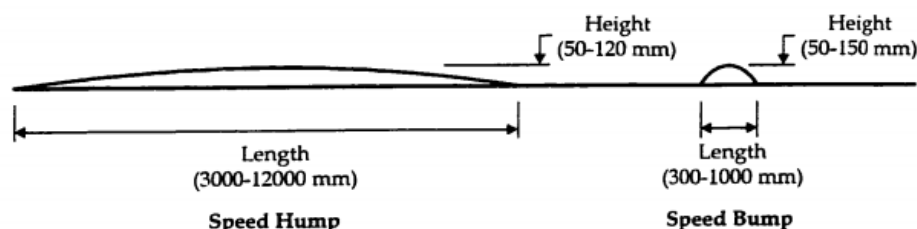


Figura 19 – Perfil de uma *Speed Hump* e de uma *Speed Bump* (Weber, 1998)

Dentro do grupo das *Speed Hump*, existem dois tipos de perfil: circular e trapezoidal. Estas segundas estão mais relacionadas com o atravessamento pedonal (Silva et al., 2013) devido ao seu comprimento e à cota máxima se aproximar da do passeio. Costumam ser denominadas em português por passagem pedonal elevada. O mesmo tipo de lomba também pode ser utilizado em interseções, onde a área elevada engloba todo o local podendo também abranger a zona de aproximação de vias que convergem para a interseção. São normalmente denominadas por interseções em plataforma.

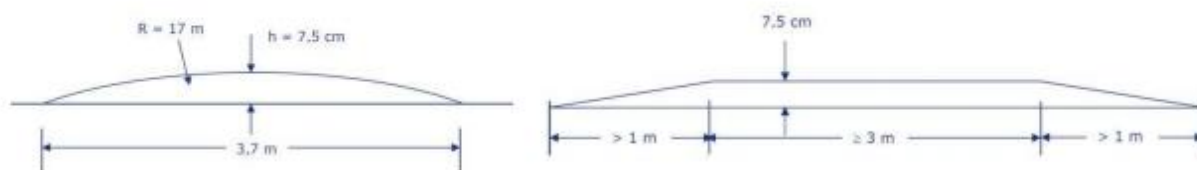


Figura 20 – *Speed Hump* circular e trapezoidal (Silva et al., 2013)



Figura 21- Plataforma elevada na Póvoa de Varzim (Google maps)



Figura 22- Passagem pedonal elevada (Autor)

Independentemente das lombas serem a medida mais comum a ser implementada uma vez que são a solução com melhor desempenho e eficácia na redução da velocidade (Duarte, 2018), estas podem acarretar perturbações a outro tipo de utilizadores da via pública e a quem não são diretamente dirigidas, como é o caso dos ciclistas e veículos longos, nomeadamente os transportes coletivos e os veículos de emergência. De forma a atenuar este inconveniente para os veículos longos, a solução seria alongar o comprimento das lombas, para valores compreendidos entre os 9 e 12 metros. Além desta solução existe a lomba combinada onde se consideram diferentes inclinações de rampas para os diferentes utilizadores e a lomba “almofada” (*speed cushion*), onde a elevação se limita à zona central da via permitindo que os veículos pesados, que apresentam maiores distâncias entre rodados, a transponham sem a galgar (Silva, 2012). No que toca aos ciclistas, os procedimentos mais comuns passam ou pela interrupção da lomba numa faixa exclusiva, lateral ao passeio com largura compreendida entre 0,9 a 1,2 metros ou ao rebaixamento das extremidades das lombas (Carvalho, 2019).



Figura 23 – Exemplo ilustrativo de uma lombada combinada (Santos, 2014)

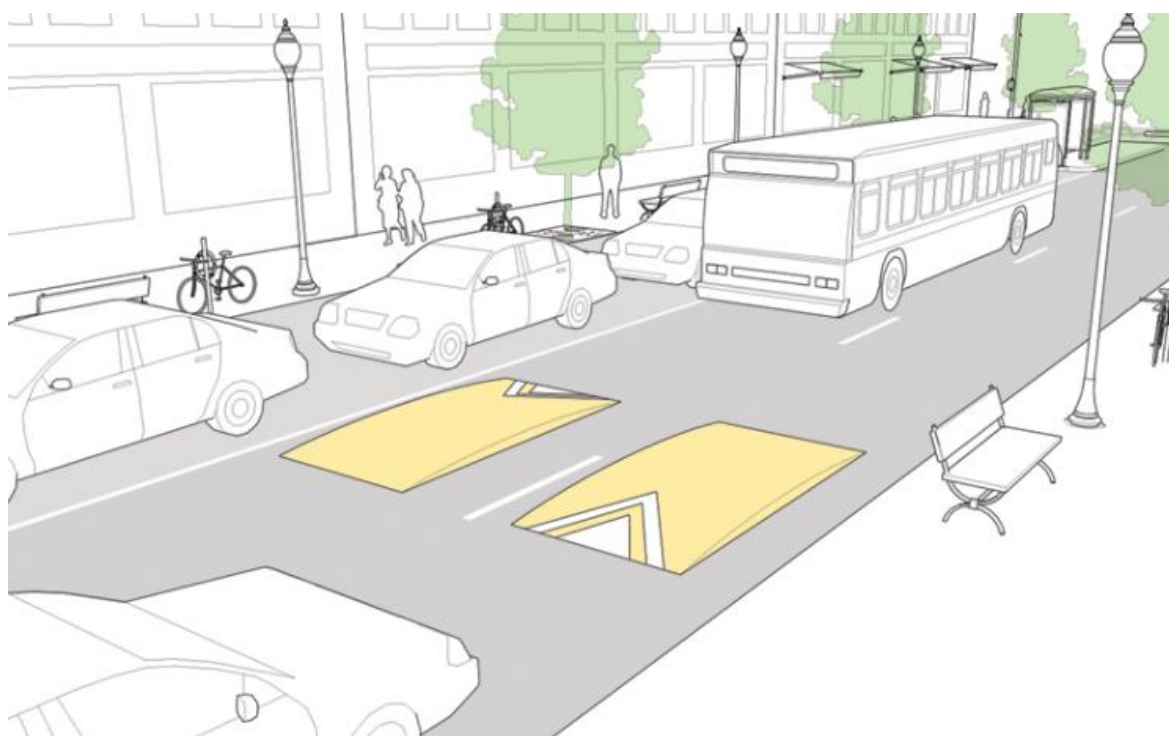


Figura 24 – Exemplo ilustrativo de uma lombada ‘almofada’ (Officials, 2019)

Segundo (Vieira, 2008) as lombas apresentam as seguintes vantagens e desvantagens.

Vantagens:

- Redução da velocidade dos veículos em aproximadamente 25%
- Redução do volume de tráfego em aproximadamente 20%
- Dispensável a reduzir de lugares de estacionamento
- Ausência de problemas para ciclistas
- Redução da velocidade de circulação dos veículos entre 8km/h e 16km/h no caso das *Speed Bumps* e entre 32 km/h e 40km/h no caso das *Speed Humps*

Desvantagens:

- Indistinação das classes dos veículos, em algumas tipologias, podendo tornar-se impopulares junto dos condutores de transporte público
- Dificuldade de operação para os veículos de emergência podendo, além disso, provocar maiores lesões a doentes com problemas na zona lombar
- Desconforto dos ocupantes dos veículos, sendo mais prejudicial em pessoas com algum problema de saúde devido ao excesso de vibração e aceleração vertical
- Aumento da poluição sonora prejudicando essencialmente os moradores
- Danos nos veículos em particular na suspensão destes
- Custos de manutenção devido a problemas de drenagem

4.2.2 MEDIDAS INOVADORAS

Começando pelos sistemas que também proporcionam a recolha e armazenamento de energia, que é uma das funções do PEH existem 2 tipos de fonte de energia: luz solar ou a energia mecânica produzida pela passagem do veículo sobre o sistema. Comparando os sistemas que usam a energia solar como fonte de energia com os que utilizam a energia mecânica dos veículos, a primeira encontra-se numa fase mais desenvolvida. Contudo, a maior parte da pesquisa e desenvolvimento recai sobre a segunda tecnologia devido ao seu maior potencial em relação à eficiência de conversão e geração de energia e condições de adaptabilidade ao pavimento das estradas (Duarte, 2018).

O tipo de tecnologia mais eficiente para captar a energia solar é a energia fotovoltaica. Todavia, a implementação de pavimentos com painéis fotovoltaicos tem sido um grande desafio devido ao vidro integrado nas células fotovoltaicas que condicionam a aderência do veículo, necessária para assegurar a segurança rodoviária.

Em relação aos sistemas que utilizam a energia mecânica dos veículos como fonte de energia, a tecnologia piezoelétrica foi a primeira a conquistar a atenção dos investigadores. Contudo, devido à sua menor eficiência de conservação de energia foi deixada de parte. Em contrapartida, houve um aumento da pesquisa e desenvolvimento de sistemas eletromecânicos, que recolhem a energia mecânica dos veículos, e utilizando geradores eletromagnéticos, geram energia elétrica. Estes, em conjunto com sistemas hidráulicos, registaram maiores valores de geração de energia em testes experimentais. Ademais, a sua instalação também é mais fácil que os sistemas piezoelétricos apresentando, assim, maior taxa de sucesso como solução eficaz de transformar energia mecânica do veículo em energia elétrica (Duarte, 2018).

Seguidamente será realizado uma pequena análise das medidas inovadoras mais atuais que se encontram no mercado internacional, sendo que algumas ainda se encontram em fase de desenvolvimento.

Exemplos de iniciativas de pavimentos com painéis fotovoltaicos:

- *Solar Roadway*
- *Wattway*
- *Solmove*
- *SolaRoad*

A empresa *Solar Roadways* desenvolveu um sistema coletor solar para substituir as camadas superiores dos pavimentos rodoviários, capazes de suportar as cargas dos veículos, captando a energia solar e convertendo a mesma em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Além da geração de energia elétrica podem, também, reproduzir mensagens editáveis e recolher dados (Duarte, 2018).



Figura 25 -Sistema Solar Roadway (Hewitt, 2018)

A empresa *Colas*, responsável pelo sistema *Wattway*, desenvolveu a primeira tecnologia de superfície fotovoltaica projetada para ser colada sobre a superfície existente de estradas, ciclovias e estacionamentos, sem a necessidade de grandes obras de engenharia civil. A *Wattway* são visualmente discretos e combinam perfeitamente com ambiente em redor. Ademais, fornecem uma estrada resistente que pode ser traficável, impermeável e resistente ao fogo (Wattway, 2019). Por outro lado, a *Wattway* também não é das mais eficazes na conversão de energia visto que os resultados nunca chegam a atingir as previsões de potência gerada. Apenas cumpriram metade das metas traçadas no que toca à geração de energia (Carvalho, 2019).



Figura 26 - 1 km de estrada com o sistema Wattway na Normandia, França (Golson, 2016)

A *Solmove* é baseada em sistemas fotovoltaicos comprovados e combinados com uma superfície de vidro inovadora e estável que pode ser colada em superfícies horizontais. Os módulos são estáveis, resistentes a roturas e possuem uma estrutura especial que direcionam de maneira ideal a luz solar para as células fotovoltaicas subjacentes. Apresentam uma rápida e fácil execução. Esta empresa distingue-se das restantes pois está a desenvolver o sistema em 2 frentes: *Volstreet* para os veículos (figura 28 e 29), onde se focam mais na aderência ao pavimento, e *Solwalk* para os peões (figura 30), aplicada em calçadas, ciclovias e praças (Solmove, 2017a).



Figura 27 – Volstreet (Solmove, 2017a)



Figura 28 – Volstreet (Solmove, 2017b)



Figura 29 – Solwalk (Solmove, 2017a)

Na Holanda, o instituto *Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek* (TNO), juntamente com outros parceiros tecnológicos, desenvolveram um projeto piloto que consiste num sistema de ciclovias denominado por *SolaRoad* (figura 31). Esta solução é instalada em superfícies de placas de betão e aplicada na camada de base do pavimento. *SolaRoad* apesar de mostrar resultados positivos, é uma solução difícil de adotar e que requer constante manutenção e limpeza, o que dificulta a geração eficaz de energia (Duarte, 2018).



Figura 30 – Aplicação da solução SolaRoad (SolaRoad, 2020)

A seguir apresenta-se exemplos de pavimentos com sistemas eletromecânicos com geradores eletromagnéticos:

- *Lybra*
- *Pavegen*

A empresa italiana *Underground Power* desenvolveu um produto inovador denominado por *Lybra* (figura 32). Esta tecnologia consiste num pavimento com borracha especial que gera energia a partir do movimento dos veículos. Este sistema transforma a energia cinética, que advém do movimento das viaturas, em energia elétrica. Segundo o presidente executivo da *Underground Power*, a empresa propõe um sistema inovador e inteligente capaz de recuperar e absorver a energia dos veículos, abrandando-os. Com isto, aumenta a segurança rodoviária e a produção de energia limpa.

O sistema em questão foi concebido para abrandar a velocidade dos veículos, nos locais onde isso é exigido, e usar a própria energia do automóvel para compensar as emissões de CO₂. Esta tecnologia é recomendada a ser instalada perto de rotundas e passadeiras, rampas de saídas de autoestradas e estacionamentos de centros comerciais. Contudo, primeiramente, este dispositivo tem de suportar o peso dos veículos.

O *Lybra* é um dispositivo plano e modular, com 1 metro de comprimento e 3 metros de largura, que pode ser instalado em sucessão para formar plataformas de energia de diferentes comprimentos. Cada instalação é personalizada e feita de acordo com as suas necessidades de desaceleração e produção de energia (Power, 2011), (Euronews, 2014).

O *Lybra* é talvez o produto que mais se assemelha com o sistema PEH, por ter várias tecnologias em comum e princípios de funcionamento. Contrariamente ao sistema de PEH é um sistema bastante ruidoso (Carvalho, 2019).



Figura 31 – Sistema Lybra (Euronews, 2014)

O sistema *Pavegen* é direcionado para os peões (figura 33) sendo colocada em locais de circulação de peões onde recolhe energia enquanto os peões circulam sobre o pavimento. É instalado através da abertura de uma pequena vala onde se encaixa a estrutura que suportará os módulos triangulares.



Figura 32 – Pavegen (Pavegen, 2019)

Apresenta-se a seguir exemplos de pavimentos com sistemas eletromecânicos sem gerar e armazenar energia:

- *Actibump*
- *Tope Inteligente*
- *Vivadén*
- *Flex- Drempel*
- *BIV (Badén Inteligente de Velocidad)*

Actibump é um sistema dinâmico de segurança rodoviária tal como mostram as figuras 34 e 35. Quando as velocidades de circulação dos veículos forem superiores aos limites de velocidade definidos, o sistema é acionado, causando uma depressão na superfície da estrada, provocando um alerta para o condutor diminuir a velocidade. Esta tecnologia causa desconforto apenas aos condutores que circulem acima do limite estabelecido. Para os restantes, a estrada encontra-se nivelada atravessando o sistema sem qualquer desconforto. A sua instalação consiste na execução de um corte no pavimento onde a tecnologia é colocada integralmente. Posteriormente a isto, o pavimento é rematado (Edeva, 2017).

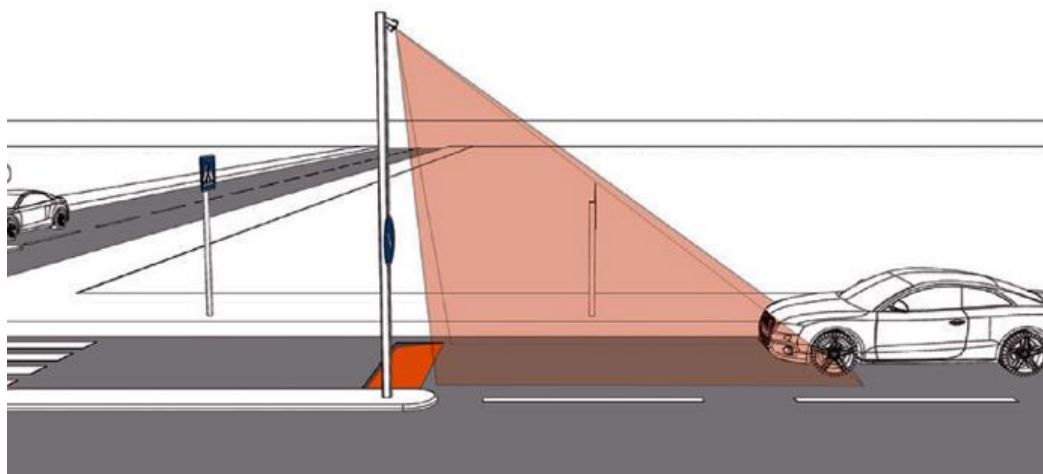


Figura 33 – Imagem ilustrativa do sistema Actibump (Edeva, 2017)



Figura 34 -Actibump (Automonitor, 2016)

Tope Inteligente é um sistema que se encontra associado a um determinado número de radares, detetando os automóveis que circulam a velocidades legais e aqueles que não cumprem os limites de velocidades estabelecidas (figura 36 e 37). Para estes últimos, o sistema é acionado e a lomba mantém-se elevada, baixando apenas para os veículos com velocidades reduzidas. A sua implantação é realizada com o aparelho já pronto e introduzido numa abertura previamente tratada do pavimento (TopeInteligente, 2020).

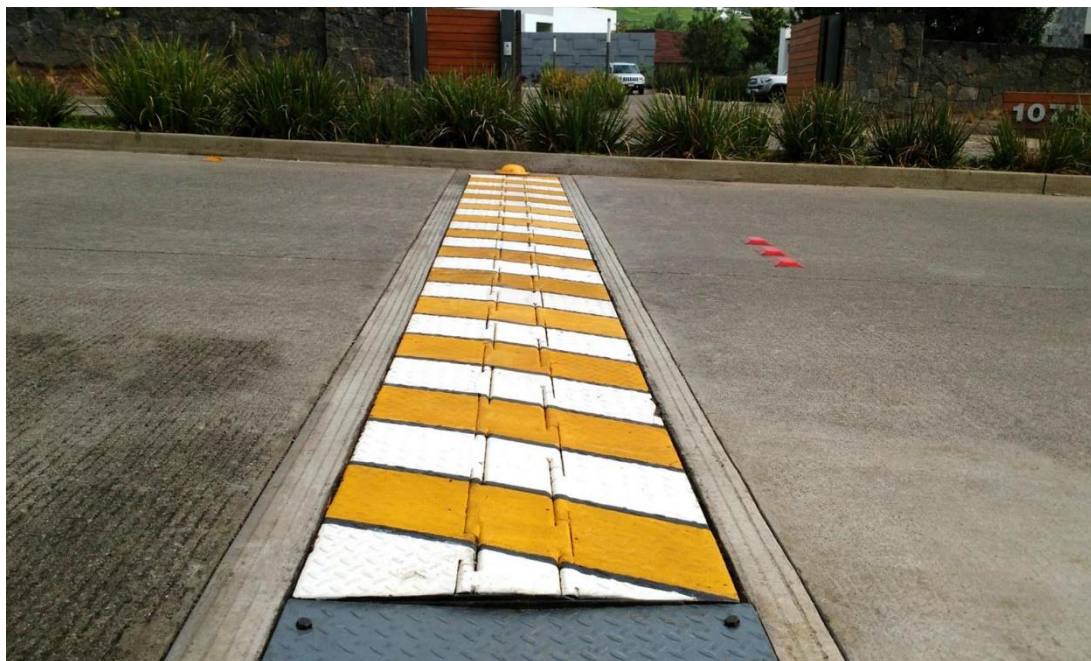


Figura 35 – Tope Inteligente quando os veículos circulam a velocidades legais (TopeInteligente, 2020)



Figura 36 - Tope Inteligente quando os veículos excedem as velocidades legais (TopeInteligente, 2020)

Vivadén é mais um exemplo de um sistema eletromecânico capaz de reduzir a velocidade dos veículos (figuras 38 e 39). Este funciona de maneira semelhante aos sistemas precedentes, ou seja, ativa quando a velocidade é excessiva. Apresenta um desnível de 7 centímetros e uma forma circular. Para a sua aplicação é necessária a escavação de uma vala que suporte o sistema e o sistema hidráulico lateral.



Figura 37 -Vivadén (ISASTUR, 2013)



Figura 38 – Vivadén (ISASTUR, 2013)

Flex Drempel consiste numa lombra flexível que atua conforme o peso dos veículos tal como se pode ver nas figuras 40 e 41. Para veículos pesados, como autocarros e veículos de emergência, este sistema é como se fosse plano e para os veículos ligeiros funciona como uma lombra redutora de velocidade normal. Uma desvantagem deste sistema é o ruído provocado quando atravessada pelo tráfego. A sua instalação é realizada através de um corte profundo no pavimento onde é inserido o sistema. Este encontra-se dentro de uma caixa de betão armado (TTS, 2020).



Figura 39 – Flex- Drempel (TTS, 2020)



Figura 40 – Aplicação do sistema Flex-Drempel (TTS, 2020)

A empresa *Badennova* desenvolveu o sistema *Badén Inteligente de Velocidad* (BIV) como mostra a figura 42, que consiste numa lomba constituída por um fluído não newtoniano que não oferece resistência para os veículos que praticam a velocidade recomendada, ou seja, o fluído comporta-se como líquido, mas para os veículos que não respeitam a velocidade, o fluído solidifica, tornando-se um

obstáculo para os condutores. Este sistema é aplicado sobre o pavimento existente com apenas o auxílio de parafusos (BadennovaSL, 2013).

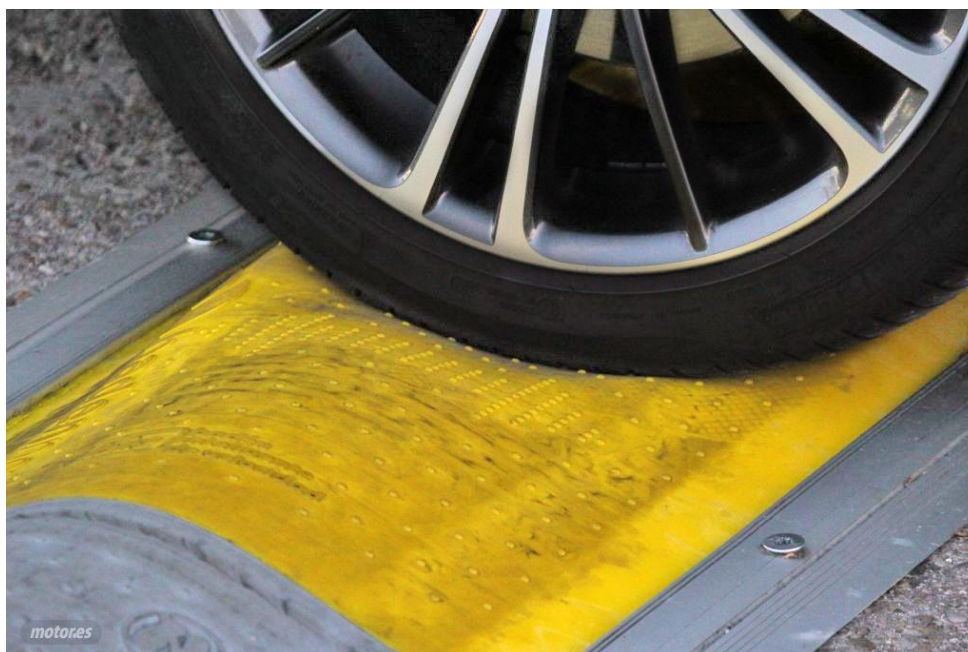


Figura 41 -Badén Inteligente de Velocidad (Badennova, 2015)

A tabela 7 resume os sistemas inovadores acima descritos bem como a sua classificação TRL (*Technology Readiness Levels*). Esta classificação foi criada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) nos anos 90, para atribuir um nível de maturidade aos projetos em desenvolvimento e a sua escala varia entre 1 e 9 e tem o seguinte significado (Carvalho, 2019):

- TRL 1: Investigação básica ou ideia em desenvolvimento;
- TRL 2: Investigação suportada por um conceito tecnológico e/ou ideia de aplicação;
- TRL 3: Investigação suportada por um mínimo de experimentação;
- TRL 4: Validação dos componentes da tecnologia em ambiente de laboratório;
- TRL 5: Validação dos componentes da tecnologia em ambiente relevante;
- TRL 6: Demonstração do protótipo em ambiente relevante;
- TRL 7: Demonstração do protótipo num ambiente operacional;
- TRL 8: Sistema real completo e qualificado em ambiente operacional através de testes e demonstrações;
- TRL 9: Sistema real finalizado e qualificado por meio de operações com êxito em missões.

Tabela 7 -Tabela síntese dos sistemas inovadores

Sistemas Inovadores		
Nome	Características	Classificação TRL
<i>Solar Roadway</i>	Captar energia solar Reproduzir mensagens editáveis Recolher dados Não reduz velocidade de veículos	TRL 8

<i>Wattway</i>	Captar energia solar Não reduz velocidade de veículos	TRL 8
<i>Solmove</i>	Captar energia solar Não reduz velocidade de veículos Atua em 2 frentes: ▪ Volstreet ▪ Solwalk	TRL 7
<i>SolaRoad</i>	Captar energia solar Não reduz velocidade de veículos	TRL 8
<i>Lybra</i>	Gera energia a partir do movimento dos veículos Redução da velocidade dos veículos (embora com impacto nos veículos) Emissão de ruído	TRL 8
<i>Actibump</i>	Redução da velocidade dos veículos (os condutores são forçados a reduzir a velocidade) Causa uma depressão na superfície do pavimento quando o veículo ultrapassa a velocidade estabelecida Emissão de impacto nos veículos Emissão de ruído Depende do condutor	TRL 7
<i>Tope Inteligente</i>	Redução da velocidade dos veículos (os condutores são forçados a reduzir a velocidade) Lomba que se mantém elevada quando os veículos circulam a velocidades superiores ao limite Emissão de impacto nos veículos Emissão de ruído Depende do condutor	TRL 9
<i>Vivadén</i>	Redução da velocidade dos veículos (os condutores são forçados a reduzir a velocidade) Lomba circular que se mantém elevada quando os veículos circulam a velocidades superiores ao limite Emissão de impacto nos veículos Emissão de ruído Depende do condutor	TRL 6
<i>Flex- Drempe</i>	Redução da velocidade dos veículos (os condutores são forçados a reduzir a velocidade) Emissão de impacto nos veículos Emissão de ruído Depende do condutor Funciona de acordo com o peso do veículo: ▪ Funciona como uma lombagem redutora de velocidade para os veículos ligeiros ▪ Funciona como uma superfície plana para os veículos pesados	TRL7
<i>BIV (Badén Inteligente de Velocidad)</i>	Redução da velocidade dos veículos (os condutores são forçados a reduzir a velocidade) Emissão de impacto nos veículos Emissão de ruído Depende do condutor Lomba constituída por um fluido newtoniano: ▪ Fluido líquido para os veículos que respeitam a velocidade ▪ Fluido solidifica para os veículos que não respeitam a velocidade	TRL7
<i>Pavement Energy Harvesting</i>	Redução autónoma da velocidade dos veículos Geração de energia elétrica Gestão de iluminação	TRL 6 em processo para TRL 7

Recolha de dados de tráfego Sem emissão de impacto nos veículos Sem emissão de ruído Não depende do condutor

4.3 ILUMINAÇÃO

A maioria dos estudos sobre iluminação viária sugere que a instalação bem como a melhoria das condições de iluminação viária melhoram significativamente a segurança rodoviária.

A meta-análise de Hoyer (2014) mostra que a instalação de iluminação nas estradas reduz significativamente o número de acidentes fatais, em situações de escuridão, em 52% e o número de lesões e acidentes não especificados, também em situações de escuridão, em 26%. O número de acidentes fatais e lesões envolvendo peões, durante a noite, reduz em 78% e 51%, respetivamente. Assim sendo, pode-se verificar que o número de acidentes reduz significativamente quando se trata de uma colisão fatal e também para os acidentes que envolvem peões. Os acidentes com lesões nas passadeiras reduzem em 53% e os acidentes em cruzamentos de áreas urbanas diminuem em 36%.

Esta mesma meta-análise indica que a melhoria das condições de iluminação viária existente geralmente tem um efeito favorável na segurança rodoviária. Níveis mais elevados de iluminação resultem em menos acidentes. Segundo este estudo, aumentar entre 2 a 5 vezes o nível de iluminação existente reduz o número de acidentes com lesões em 13%. Aumentar o nível de iluminação em 5 vezes ou mais, reduz o número de acidentes com lesões em 32%. Contudo, não foi encontrado nenhum resultado sobre o número de mortos.

Um estudo de Bhagavathula et al. (2015) mostra efeitos favoráveis nas melhorias das condições de iluminação em relação ao número de acidentes, corroborando com os resultados da meta-análise anterior. Por outro lado, o estudo de Steinbach et al. (2015) não encontrou nenhum efeito significativo e o estudo de Nabavi Niaki et al. (2016) concluiu que o maior número de acidentes com peões e ciclistas eram em locais bem iluminados. No entanto, estes autores reconhecem que estes resultados contrariam as expectativas e que poderiam resultar da não aleatoriedade de decisão dos locais a implementar ou aumentar a iluminação viária.

Em geral, pode-se concluir que a grande maioria das pesquisas disponíveis sugerem que a instalação de iluminação e a melhoria das suas condições têm um efeito bastante positivo em relação à segurança rodoviária.

O efeito de melhorar as condições de iluminação para reduzir o número de acidentes é menor do que a instalação de iluminação em locais que anteriormente estavam isentos de tal. Além disso, de modo a obter resultados bastante consideráveis é necessário aumentar o nível de iluminação, para mais que o dobro (De Ceunynck, 2017).



Figura 42 – Efeito da iluminação num ambiente de escuridão (Guimarães, 2018)

5

ESTADO DE ARTE DAS METODOLOGIAS

O presente capítulo tem como objetivo resumir estudos científicos realizados em diferentes contextos para estudar medidas similares ao sistema PEH. Com a análise destes estudos obtém-se um conjunto de conhecimentos relevantes para desenvolver uma metodologia que permita determinar a eficácia do sistema PEH, mesmo sem a sua implementação no meio viário bem como guiar futuros desenvolvimentos para avaliação do sistema após a sua implementação.

Nesse sentido, selecionou-se um conjunto de estudos sendo que os 4 primeiros têm como objetivo entender a metodologia utilizada bem como obter valores de eficácia para as lombas entre outras medidas. De seguida, apresenta-se um estudo sobre a iluminação e qual o seu impacto nos acidentes. Os 3 estudos seguintes abordam a questão da eficácia dos marcadores e da iluminação inteligente com deteção de peões, com destaque para o último destes estudos que relaciona os marcadores com os acidentes, sendo bastante relevante para a estimativa da eficácia do sistema PEH. Por fim é apresentado um estudo que demonstra quais as intervenções a serem realizadas para melhorar a segurança nas passadeiras. Contudo, este não considera como indicador da análise os acidentes, mas de forma indireta através do comportamento visual dos condutores e a velocidade dos veículos.

O primeiro estudo realizado por (V. Kudryavtsev et al., 2012) teve como objetivo explicar a redução do número de acidentes entre peões e veículos motorizados em Arkhangelsk, Rússia na sequência da implementação de medidas. Este estudo considerou um período de 6 anos e durante este período a população desta cidade da Rússia diminuiu cerca de 0,6% e os veículos motorizados aumentaram em 37,5%. Foram utilizados todos os dados acerca de acidentes com peões e infrações de trânsito registados pela polícia da cidade de Arkhangelsk durante o período em questão. Segundo a polícia, são considerados acidentes com peões todos os eventos ocorridos numa estrada e em que envolve um veículo (motorizado ou animal) que colide com um peão, originando, daí uma lesão. Para cada acidente, os dados apresentavam data, hora, tipo de local, infrações de trânsito relacionadas e tipo de lesão.

Os dados sobre as medidas de infraestruturas incluem informações referentes à alteração de características e números de passadeiras sinalizadas e não sinalizadas. São consideradas passadeiras sinalizadas todas aquelas que estão sinalizadas com sinalização vertical. Também são sinalizadas por marcas horizontas, no entanto estas acabam por ficar apagadas nos meses de inverno. O estudo inclui a instalação de sinais de trânsito, lombas e sinais refletores em passadeiras não sinalizadas. Estes eram instalados em locais de conflito nas passadeiras não sinalizadas onde tinha ocorrido 3 ou mais acidentes durante 1 ano. Foram descritos todos os locais e datas relativos a cada uma destas medidas.

O número de acidentes com peões foi dividido em 3 categorias – fora das passadeiras, em passadeiras não sinalizadas e em passadeiras sinalizadas. Os dados de infrações de trânsito foram divididos em infrações dos condutores, dos peões ou outros. Para isto, foram cruzados os dados referentes aos acidentes com peões, infrações de trânsito e total de veículos motorizados com os dados sobre mudanças na legislação nacional sobre tráfego rodoviário e a infraestrutura. A regressão binomial negativa foi utilizada para investigar as tendências nas taxas mensais de acidentes (entre peões e veículos) por total de veículos e estimar as alterações nessas taxas por unidade de mudanças nas medidas de segurança.

Durante os 6 anos, a polícia registou 2,565 acidentes entre peões e veículos dos quais 62% foram fora das passadeiras, 30% nas passadeiras não sinalizadas e 8% em passadeiras sinalizadas. A taxa de acidentes fora das passadeiras e em passadeiras sinalizadas diminuiu em média 1,1% por mês, enquanto que a taxa de acidentes em passadeiras não sinalizadas permaneceu inalterada. Os números de passadeiras sinalizadas e não sinalizadas aumentaram em 14 e 19%, respetivamente. Além disso, 10% das passadeiras não sinalizadas foram combinadas com lombas e 4% com sinais verticais refletivos.

Com isto, foi possível concluir que a introdução de medidas a nível da infraestrutura e legislativas é a explicação mais provável para a redução de acidentes entre veículos motorizados e peões em Arkhangelsk. A redução geral deve-se a reduções nas taxas de colisões fora das passadeiras e nas passadeiras sinalizadas. Nenhuma mudança foi observada na taxa de acidentes nas passadeiras não sinalizadas.

O segundo estudo realizado por (Pau e Angius, 2001) teve como objetivo geral avaliar se a velocidade de tráfego era compatível com os limites divulgados e com as necessidades de segurança dos peões. Para atingir esse objetivo, foram analisados todos os sistemas de lombas de uma cidade de Itália de tamanho médio de modo a avaliar as características da velocidade de tráfego tanto nos locais que apresentavam lombas como nas passadeiras protegidas por estas, e também em secções afastadas dos dispositivos.

Assim sendo, foram realizadas observações de velocidades praticadas na cidade de Cagliari através de um contador de tráfego a laser devidamente posicionado na janela de um veículo, estacionado paralelamente à direção do tráfego. O contador regista a velocidade, comprimento dos veículos, direção da viagem e fluxo total do tráfego. Os dados foram obtidos em locais de passadeiras protegidas com lombas, ruas que apresentavam este dispositivo (mas com uma distância tal que a sua influência no condutor não tivesse sido considerada perdida), e em ruas que não continham lombas instaladas. Cada análise foi realizada 4 vezes num dia intermédio da semana (terça, quarta ou quinta) fora dos horários de pico, de forma a esta estar o mais próximo das condições de fluxo livre. Enquanto o contador gravava, um operador registava o número de veículos que travavam na presença de lombas. Após isto, com os dados obtidos, foi possível identificar os locais onde as lombas modificavam significativamente o comportamento dos condutores. Com base nos resultados deste processo, 4 locais foram selecionados para realizar um estudo detalhado do perfil de velocidades antes e depois da posição das lombas (foram obtidos dados de velocidade em 13 pontos em um intervalo de 200 metros). Por fim, a relação entre as velocidades e a largura total das estradas foram analisadas, tanto em zonas de lombas como em zonas de secções livres. Para verificar se as variações de velocidade observadas durante as comparações são estatisticamente significativas, foram realizados testes de variância.

Como resultados, as velocidades podem ser subdivididas em três grupos: cerca de 30% dos casos, a velocidade do percentil 85 é acima do limite de velocidade registado (50 km/h), enquanto que em 26% dos locais, os valores de velocidades estão situados entre 45 e 50 km/h. No restante, as velocidades encontravam-se abaixo dos 45km/h. Em relação à velocidade média, mais de 50% das observações encontram-se entre os 30 e 40 km/h, 26% encontram-se acima de 40 km/h e 17% abaixo de 30 km/h. O estudo também mostrou que a velocidade diminuiu até atingir o seu mínimo no local da lomba e seguidamente aumenta. Através deste estudo também se obteve que no caso de secções livres, a velocidade tendia a aumentar à medida que a largura da estrada também aumentava.

Para finalizar, os resultados mostram que em quase um terço das instalações, os limites de velocidades eram infringidos e outro terço, a velocidade do percentil 85 está entre os 45 e 50 km/h. Em comparação entre os valores de velocidade registados nas lombas e nas passadeiras seguidas de lombas, mostram que na maioria dos casos a utilização das lombas não é realmente eficaz na proteção das passadeiras. Os resultados mostram também que o efeito das lombas é bastante local, apresentando uma redução de velocidade numa distância compreendida entre os 30 e 60 metros. Além disso, também se concluiu que à medida que a largura da via aumentava, a velocidade também aumentava. Os autores do estudo recomendam a utilização de lombas combinando outras medidas de acalmia de tráfego.

Este estudo realizado por (Rothman et al., 2015) tem como objetivo comparar as taxas de acidentes entre veículos e peões antes e após a instalação de lombas redutoras de velocidade. Para este estudo foram incluídas vias onde foram instaladas lombas durante o período do estudo (janeiro de 2000 a dezembro de 2011). Os dados de acidentes foram obtidos através de relatórios policiais arquivados, incluindo as coordenadas gps, idade e gravidade do acidente. Com um buffer de 25 metros, representando a largura da estrada, foi possível capturar todas as colisões com peões que ocorreram perto ou na via. As colisões foram atribuídas a vias com lombas e todos os acidentes que ocorreram a mais de 25 metros (superior à largura da via) ou ocorreram no mesmo dia da instalação das lombas foram excluídas. A estação do ano foi considerada uma variável explicativa e dividida em verão (abril a setembro) e outono-inverno (outubro a março). Características do ambiente envolvente às vias com lombas também foi considerado uma variável explicativa. Os dados do tipo de via foram incluídos como uma variável binária que identificava os locais das vias que continham ou não lombas. Outra variável binária considerada foi a relativa ao tipo de ocupação da zona em estudo. Utilizando um índice de entropia, foi classificado o uso do solo ao longo das vias com lombas (0- uso único do solo, 1- distribuição igual de uso do solo). A taxa de acidentes refletia o número de colisões por cada metro de via com lombas por mês durante o período de 12 anos. A associação entre essa taxa foi ajustada por estação do ano, tipo de estrada, zona e uso do solo com a aplicação da regressão de Poisson. A redução percentual do número de colisões entre peões e veículos em estradas sem lombas foi comparada com o respetivo valor em estradas que apresentavam este dispositivo. Foi calculado, também, o número de acidentes caso não fosse instalado as lombas. Foram realizadas outras análises por idade e gravidade de lesão usando modelos ajustados.

Foram contabilizados 27,827 acidentes entre peões e veículos, com 1,344 colisões ao longo de 409 estradas com lombas instaladas. A taxa de acidentes / metro de estrada / mês diminuiu após a instalação de lombas (0,067 colisões/km/mês para 0,060 colisões/km/mês). A estação do inverno, as estradas consideradas distribuidoras, o centro da cidade que é considerado mais complexo e os locais com vários usos do solo foram associados a um maior número de acidentes. A associação entre lombas e a taxa de acidentes deste tipo, diminui mais para as crianças do que para os adultos.

Por fim, as lombas foram consideradas o método mais fácil de utilizar para a acalmia de tráfego com um efeito protetor bastante significativo no número de acidentes entre peões e veículos, principalmente para as crianças. No entanto, o estudo alega a necessidade de realizar uma análise em toda a área de forma a garantir que os acidentes não são deslocados para outras áreas envolventes.

Os autores (Jateikienė et al., 2016) avaliaram um conjunto de medidas de alterações nos alinhamentos verticais (lombas) nas estradas mais importantes da Lituânia através dos dados dos acidentes mortais e com ferimentos. Os locais com lombas cuja data de implementação era desconhecida e aqueles que não apresentavam qualquer tipo de acidentes antes e após a implementação de lombas foram excluídos. As lombas analisadas neste estudo foram divididas em 4 grupos: *speed humps* com formato trapezoidal, passagem pedonal elevada, *speed bumps* e interseções em plataforma. Lombas que apresentavam uma distância superior a 600 metros umas das outras foram consideradas como objetos separados, no entanto se fosse menor que 600 metros eram considerados como um objeto único. Em locais onde foram implementadas lombas *speed humps* com formato trapezoidal foi possível verificar uma diminuição de 36% no número de acidentes, 100% no número de mortos e 45% em feridos. Nas secções com passagens pedonais elevadas, houve um decréscimo de cerca de 65% no número de

acidentes, cerca de 83% no número de mortos e aproximadamente 68% no número de feridos. Nos locais com lombas *speed bumps*, o número de acidentes diminuiu em 73% e o número de feridos em 77%. Por fim, nos cruzamentos onde foram instaladas alterações nos alinhamentos verticais, o número de acidentes diminuiu cerca de 44%, o número de mortos em 75% e de feridos aproximadamente 29%. De uma forma geral, as medidas de alterações nos alinhamentos verticais reduzem o número de acidentes em 60%, o de mortos em 63% e feridos em 82%.

Para a análise de dados referentes a acidentes mortais e com ferimentos em secções rodoviárias equipadas com radares fixos foram selecionados quais os acidentes para cada secção com radares. Para tal foi tido em consideração que o comprimento de secção relevante é de 2 a 1 km para cada lado. No período de estudo antes da instalação de radares fixos de controlo de velocidade e nas secções de controlo ocorreram 276 acidentes, dos quais 68 foram mortos e 355 feridos. Após a instalação dos radares o número de acidentes diminuiu para 166 (40%), o número de mortos para 41 (40%) e feridos para 195 (45%).

Em suma, a análise de dados referentes a acidentes fatais e com lesões em estradas com alterações nos alinhamentos verticais mostraram uma diminuição significativa após a sua instalação. O número de acidentes fatais e com lesões diminuiu em 60%, o número de vítimas com ferimentos diminuiu em 63% e o número de mortos em 82%. Com a instalação de radares de controlo de velocidade, o número de acidentes mortais e com lesões diminuiu em 32%, o número de vítimas com ferimentos diminuiu em 36% e o número de mortos em 33%.

Relativamente ao efeito da iluminação viária no número de acidentes, a Comissão Internacional da Iluminação (*International Commission on Illumination*) analisou 62 estudos de 15 países dedicados a esta medida. Segundo 23 estudos que utilizaram a metodologia antes e depois, a instalação de iluminação reduz em 30% o número de acidentes com vítimas ocorridos durante a noite. De todos os estudos analisados, apenas um indicou um aumento em relação ao número de acidentes e todos apresentaram um efeito de diminuição dos acidentes superior no caso dos acidentes com peões. Também no *Handbook of Road Safety Measures* foram resumidas evidências de 38 estudos que avaliaram o efeito da iluminação em estradas anteriormente sem iluminação. Com base numa meta-análise de vários estudos, verificou-se que esta medida está associada a uma redução de 64% dos acidentes fatais no período noturno, 28% em acidentes com ferimentos e 17% em acidentes com danos materiais (Wanvik, 2009).

Estes valores obtidos por (Wanvik, 2009) foram conseguidos pelo cálculo do odds ratio (razão de probabilidade) do efeito da iluminação baseado apenas no número de acidentes. Este parâmetro foi estimado para cada hora do período noturno separadamente e apenas para os horários que com mais de 15 acidentes foram incluídos no cálculo do odds ratio. Todos os acidentes, nos períodos noturnos selecionados, causados por fadiga, álcool ou excesso de velocidade foram rejeitados.

Um segundo parâmetro foi baseado num método para avaliar o risco associado à escuridão. Para tal, analisou-se a variação ao longo do ano do número de acidentes numa hora específica para assim estimar o risco de acidentes associados à escuridão. Ou seja, certas horas do dia apresentam uma maior escuridão durante uma parte do ano e dessa forma será de esperar que nessas alturas o número de acidentes seja maior, uma vez que a falta de iluminação está associada a um maior risco de acidentes. Para tal foi necessário um grupo de controlo que no caso corresponde a definir uma determinada hora que tenha luz o ano inteiro para verificar possíveis alterações sazonais no número de acidentes. Assim, estimativas semelhantes são realizadas para estradas iluminadas e não iluminadas e a razão do odds ratio é calculada para estimar o efeito da iluminação da estrada. Posteriormente a isto, foram combinadas estas duas análises, usando a mesma amostra de dados de maneira a fortalecer a validade dos resultados.

Segundo o estudo, verificou-se que para todas as estradas holandesas, o efeito em média da iluminação durante períodos de escuridão, reduzem em 50% os acidentes com lesões. A iluminação apresenta um

maior efeito na taxa de acidentes fatais do que em acidentes com lesões, em períodos de escuridão. Além disto, também se verificou um maior efeito para os peões, velocípedes, motocicletas ou ciclomotores do que para os acidentes com veículos. Por outro lado, a iluminação apresenta um menor efeito nas estradas urbanas do que nas rurais. O efeito da iluminação reduz em 54% o número de acidentes com ferimentos em estradas rurais.

Como é de esperar, o efeito da iluminação da estrada é significativamente menor em casos de condições atmosféricas adversas. O risco de acidentes com vítimas aumenta em 17% em estradas rurais iluminadas e 145% em estradas sem iluminação. Em caso de chuva, o risco médio é de 53% em estradas rurais iluminadas e 192% em estradas sem iluminação. O aumento médio do risco de acidentes com peões é de 141% em estradas rurais iluminadas e 361% em estradas rurais sem iluminação.

Outro estudo realizado por (Nambisan et al., 2009) pretende avaliar a eficácia de um sistema automático de deteção de peões e um sistema de iluminação inteligente de forma a melhorar a segurança dos peões. Através de análises de dados sobre colisões e através de observações de campo foram identificados os seguintes problemas:

1. Não havia passadeira antes da implantação das medidas no local selecionado. Contudo a instalação da passadeira não melhorou o comportamento dos peões nem a segurança.
2. A maioria dos condutores não cediam a passagem aos peões
3. Os peões não esperavam por intervalos aceitáveis no tráfego
4. A maioria de acidentes ocorriam durante a noite

De acordo com os problemas encontrados foram implementados dispositivos de deteção de peões e iluminação inteligente no local. Estes dispositivos destinam-se a ajudar a detetar a presença de um peão e iluminar a passadeira com luzes de alta intensidade de forma a melhorar a visibilidade dos peões e consequentemente a segurança em condições noturnas. Considera-se que o aumento repentino na intensidade da iluminação é mais eficaz do que o contínuo uso de luz de alta intensidade.

A avaliação da eficácia das medidas concentrou-se no comportamento dos peões e condutores (cediam a passagem ou paravam) nas passadeiras. As observações de campo foram realizadas por especialistas que registaram manualmente os dados. Foram observados os seguintes dados:

1. Se o peão olhou para a esquerda antes de começar a travessia
2. Se o peão olhou para a direita antes de começar a segunda parte da travessia
3. Peões com trajetórias desviadas, ou seja, aqueles que mudaram o seu percurso para utilizar a passadeira
4. Peões parados na estrada, ou seja, quando os peões atravessam em intervalos curtos e têm de esperar por outra oportunidade no centro da via
5. Atraso dos peões
6. Se o condutor cedeu passagem
7. E em caso de o condutor ceder a passagem, a que distância o veículo parou da passadeira

Os resultados indicam que houve um aumento do uso da passadeira após a implementação do sistema de deteção de peões e iluminação inteligente avaliados em períodos semelhantes (de 44 para 84, aumento de cerca de 48%). Todos os peões observados procuraram olhar para a esquerda e para a direita antes de atravessar, o que implica que estas medidas não dão uma falsa sensação de segurança aos peões. Os dados demonstraram que houve um crescimento de 14% no número de peões com trajetórias desviadas o que significa que são medidas que atraem os peões, e a proporção de peões parados na via diminuiu 16% o que expressa que o sistema de iluminação inteligente ajuda os condutores a reconhecer a presença de peões nas passadeiras ou perto delas. Em relação aos condutores, a proporção de automobilistas que cediam a passagem aos peões aumentou cerca de 13%. O atraso médio dos peões inicialmente era de 7,5 segundos e após a medida diminuiu para 3,8 segundos. Já o atraso médio dos veículos aumentou de 0,7 para 2,2 segundos. Contudo, o estudo menciona que estas alterações são sem significância estatística.

Em suma, duas medidas foram implementadas e avaliadas num local de teste onde as principais preocupações era o comportamento dos peões e dos condutores bem como a segurança dos peões em condições noturnas. Os resultados das observações de campo e a análise estatística mostraram que as implementações destes dispositivos ajudaram a melhorar a segurança dos peões.

O sistema *LightGuard- flashing crosswalk* consiste em luzes intermitentes no pavimento que são ligadas quando os peões passam nos sensores. Essa iluminação é embutida no pavimento de forma a delinear os limites das passadeiras.



Figura 43 – Passadeira com o sistema *LightGuard- flashing* (Huang et al., 1999)

No estudo de (Huang et al., 1999) foram recolhidos dados antes e depois referentes às velocidades e cedência de passagem por parte do condutor. Os dados do período antes foram recolhidos em março de 1997 e os dados do período depois reportam abril de 1998, ambos os dados correspondem ao período diurno. Em relação às velocidades dos veículos, foi avaliado se os condutores abrandavam na presença de um peão na passadeira com iluminação intermitente. Foram avaliadas as velocidades de 42 e 47 veículos, nos períodos antes e depois, respetivamente. Quando o peão tentava atravessar, a velocidade do veículo diminuiu cerca de 3,1 km/h em média após a implementação dos marcadores de estrada. Por outro lado, quando o veículo circulava na via interior, a velocidade diminuiu 0,8 km/h. Quando não havia sinalização de peões, as velocidades também diminuíram cerca de 1,3 km/h nas vias junto aos lancis e 4,8 km/h nas vias interiores. Contudo, nenhuma alteração da velocidade foi considerada significativa. O estudo também acrescenta que a iluminação intermitente das passadeiras pode chamar a atenção dos condutores e dessa forma diminuir a velocidade, contudo afirmam que não está claro o porquê de abrandarem quando não há peões. Para avaliar a cedência por parte do veículo, o objetivo foi determinar se os condutores cedem com mais frequência a passagem a um peão nas passadeiras com marcadores. No período antes, 7,4% dos condutores pararam completamente para o peão atravessar, 5,6% reduziram a velocidade, mas não cederam a passagem e os restantes não reduziram a velocidade. No período depois quando a iluminação intermitente estava ativa, 10,9% dos condutores pararam completamente e 23,4% reduziram a velocidade. Em resumo, verificou-se que os condutores pararam ou diminuíram mais a velocidade para os peões atravessarem na presença de passadeiras com marcadores de estrada.

Pelo estudo de (Patella et al., 2020), à semelhança do anterior, teve como objetivo avaliar as melhorias na segurança obtidas através de um sistema inovador de iluminação LED posicionado nas passadeiras, que se ativa com a passagem dos peões sobre um sensor tal como mostra a figura 45.



Figura 44 - Sistema de iluminação LED (Patella et al., 2020)

Com base num instrumento TRUSPEED *telelaser* foi possível determinar as medições de velocidades de um veículo isolado. Este aparelho pode ser utilizado a distâncias compreendidas entre os 20 e 650 metros do veículo, em linha reta. Depois dos dados estarem recolhidos procedeu-se à reconstrução dos perfis de velocidade dos veículos ao longo do segmento da estrada nos seguintes cenários: LED ligado e desligado.

Os resultados deste estudo mostraram que esta tecnologia inovadora teve um impacto na redução da velocidade média dos veículos igual a 19,3% na travessia de passadeiras, diminuindo dessa forma o risco de acidente e de mortalidade. Além disto, também se verificou que na ausência de peões a velocidade dos veículos reduzia em 16,4% quando os LEDs se encontravam ligados.

Para concluir, a aplicação deste sistema de iluminação LED demonstrou ter um efeito positivo no comportamento dos condutores, no entanto é imprescindível estudar o impacto para uma amostra maior de modo a tornar os valores cada vez mais confiáveis.

Por último o estudo do autor (Vignali et al., 2019) tem como objetivo avaliar o efeito da presença de ilhéu central de refúgio para atravessamento da via e de um sinal vertical luminoso intermitente de alerta para passagem de peões na velocidade dos veículos e no comportamento visual dos condutores que se aproximam das passadeiras. Este estudo foi realizado através de uma análise antes e depois. De forma a avaliar quais as passadeiras que atraíam mais a atenção dos condutores através do comportamento visual, considerando que este está relacionado também com a velocidade de circulação, foram analisados os movimentos dos olhos dos condutores através de um dispositivo móvel de registo ocular. Para isto foram selecionados 10 participantes que não sabiam o objetivo do estudo e não tinham experiência prévia de condução no segmento de estrada considerado. Foi ainda avaliada a velocidade assumida pelos condutores nos períodos antes e depois da implementação das medidas.

As intervenções para melhorar a segurança nas passadeiras foram (ver figura 46):

- Colocar um ilhéu central de refúgio, de forma a permitir que os peões façam a travessia em duas fases. Este ilhéu é constituído por marcadores no pavimento, delineadores reflexivos e uma lâmpada led a iluminar de forma intermitente no passeio.
- Rampas nos passeios com 8% de inclinação para as pessoas com mobilidade reduzida

- Sinais verticais a sinalizar passadeiras nos dois lados, com iluminação led intermitente para alertar
- Postes de iluminação led lateral, de cada lado a 3,50 metros de altura do nível da estrada

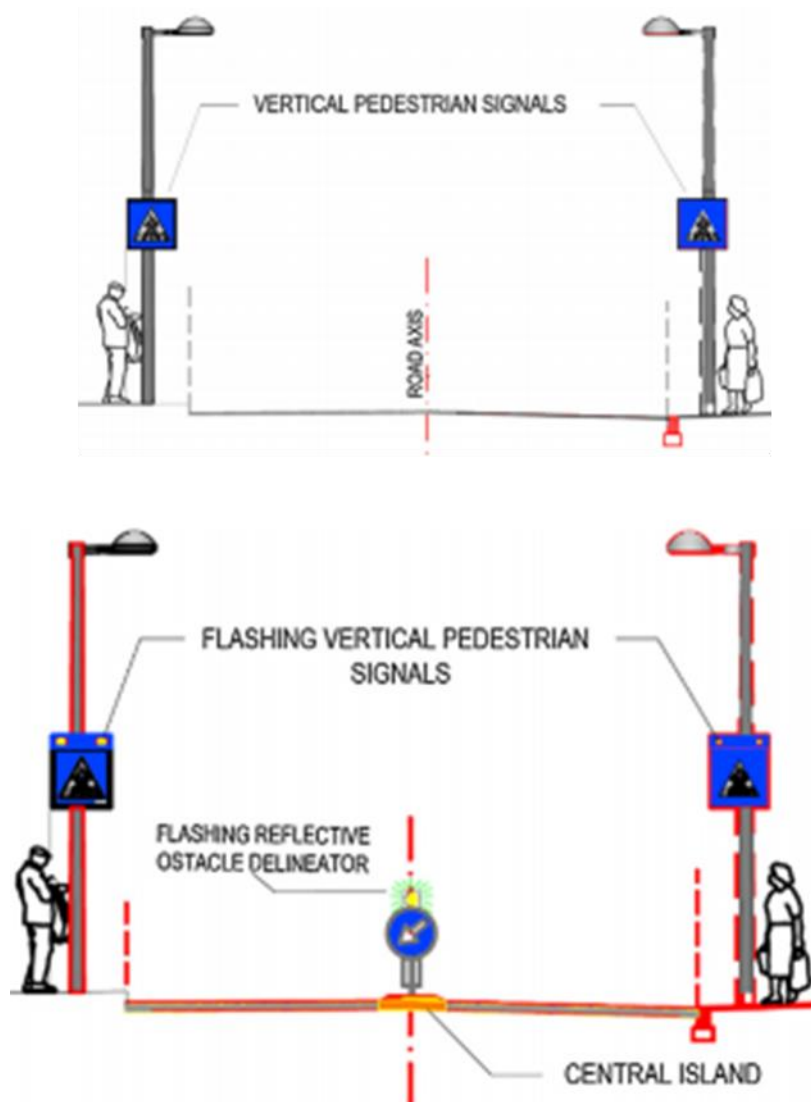


Figura 45 - Passadeira antes e após a intervenção (Vignali et al., 2019)

Com as intervenções descritas anteriormente verificou-se um aumento significativo do tempo de fixação do olhar dos condutores para as passadeiras e a presença da iluminação led aumentou a visibilidade e o tempo de fixação do olhar para os sinais verticais. O ilhéu central de refúgio, anteriormente inexistente, foi visto por 60,7% dos condutores e a distância do primeiro olhar de fixação das passadeiras aumentou em 44,7%. Em relação ao parâmetro da velocidade, este também diminuiu após a intervenção. Contudo o efeito de atenção visual das passadeiras foi maior do que na velocidade.

6

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO SISTEMA PEH

Neste capítulo apresenta-se 2 metodologias distintas para estimar a eficácia do sistema PEH. A primeira baseia-se no cálculo do CRF tendo em consideração medidas similares e estudos anteriores. A segunda metodologia trata-se de uma proposta para futura aplicação após a implementação do sistema num determinado local e tendo em conta as características do local em termos de variáveis de exposição.

6.1 METODOLOGIA PARA ESTIMAR O CRF DO SISTEMA PEH

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia capaz de avaliar o impacto do *Pavement Energy Harvesting* (PEH) foi necessário, primeiramente, ter bem presente a eficácia das medidas de acalmia de tráfego enunciadas no capítulo 3, uma vez que estas vão servir de base para tentar obter um coeficiente de eficácia para o sistema PEH. Na tabela 8 estão representadas as medidas divididas por grupos em função do tipo de medida bem como a identificação dos intervalos de valores do CMF (mínimo e máximo). A partir deste intervalo determinou-se o valor médio e a partir deste, calculou-se o valor de CRF considerando $CRF = 1 - CMF$. Este coeficiente corresponde à redução do número de acidentes após a implementação de uma dada medida.

Tabela 8 - Tabela com CMF e CRF das medidas

Grupo	ID	Medidas	CMF	Média	CRF (%)
CONTROLO DE VELOCIDADE					
1	1	Instalação de radares fixos	0,39	1,46	0,925
	2	Instalação de radares combinados com semáforos	0,72	1,61	1,165
LOMBAS					
2	1	Lombas	0,5	0,6	0,55
	2	<i>Speed Humps</i> com formato trapezoidal	0,64		
	3	<i>Speed Bumps</i>	0,27		
	4	Passagens pedonais elevadas	0,35		
SINALIZAÇÃO					
3	1	Redução 5% da velocidade média	0,83	0,95	0,89
	2	Redução 10% da velocidade média	0,68	0,9	0,79
	3	Redução 15% da velocidade média	0,56	0,85	0,705

	4	Redução do limite 50 para 40 km/h	0,501	0,821	0,661	34
	5	Redução do limite 80 para 60 km/h	0,44	0,86	0,65	35
	6	Redução do limite 80 para 60 km/h nos cruzamentos	0,53	0,56	0,545	46
	7	Redução do limite 90 para 70 km/h	0,64	1,11	0,875	13
ILUMINAÇÃO						
4	1	Iluminação	0,27	0,84	0,555	45
	2	Instalar iluminação	0,3	0,922	0,611	39
	3	Fornecer iluminação rodoviária	0,31	0,83	0,57	43
	4	Fornecer iluminação nas interseções	0,19	1,09	0,64	36
	5	Instalar iluminação	0,881		0,881	12
	6	Melhorar a iluminação de interseção	1,158		1,158	-16
ALTERAÇÃO NAS VIAS						
5	1	Converter vias de 3,6 para 2,7 metros	0,44	0,62	0,53	47
	2	Converter vias de 3,6 para 3 metros	0,58	0,73	0,655	35
	3	Converter vias de 3,6 para 3,3 metros	0,76	0,85	0,805	20
	4	Implementar um estreitamento com bandas sonoras controlado por STOP	0,58	1,54	1,06	-6

É de lembrar que o sistema PEH é semelhante às lombas redutoras de velocidade na medida em que este também pretende atuar principalmente ao nível da redução da velocidade dos veículos, contudo de forma autónoma, com o objetivo de reduzir o número de acidentes, em particular os atropelamentos. Além disto, o PEH também pretende gerir a iluminação pública do local e a sinalização horizontal (marcadores de estrada) e vertical (sinalização vertical com led) devido à captação de energia cinética proveniente dos veículos e que é convertida, posteriormente, em energia elétrica. A figura 47 ilustra o sistema PEH.

Assim sendo, de forma a aumentar a segurança rodoviária, nomeadamente a segurança dos utentes mais vulneráveis da via, este sistema pretende atuar em 3 vertentes:

- Controlo de velocidade
- Sinalização horizontal e vertical com led
- Iluminação pública inteligente

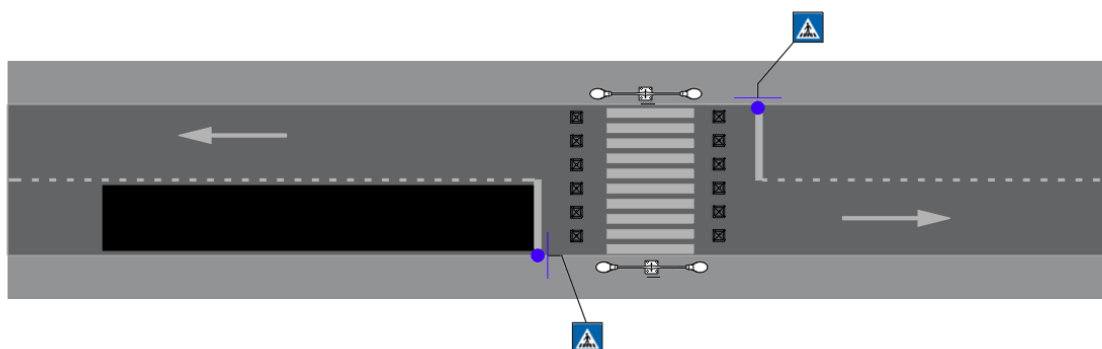


Figura 46 – Desenho ilustrativo do sistema PEH (Autor)

Com o objetivo de estimar a potencial eficácia do sistema PEH, e considerando que o sistema ainda não está implementado e como tal não é possível aplicar metodologias do tipo antes e depois similares às descritas anteriormente no capítulo 3, identificou-se para as 3 vertentes do sistema, vários CRF determinados em estudos anteriores. Como não existe estudos de medidas similares ao sistema PEH, isto é, medidas que atuam nas mesmas vertentes do sistema, teve-se em consideração diversos estudos focados nas 3 vertentes do sistema, mas isoladamente, isto é, sem sobreposição dos efeitos. Contudo, verificou-se não existir valores de CRF relativos à vertente da iluminação pública inteligente.

Para o controlo da velocidade teve-se em consideração 4 valores diferentes para o CRF. O primeiro valor foi determinado através dos valores de CMF mencionados na tabela 8 correspondente à redução de 5%, 10% e 15% na velocidade média dos veículos. Uma vez que o dispositivo PEH pretende reduzir 40% da velocidade dos veículos, criou-se um gráfico com uma linha de tendência linear de forma a obter o primeiro valor referente ao controlo de velocidade a partir da equação dessa reta, que corresponde a 78% de redução do número de acidentes (CRF).

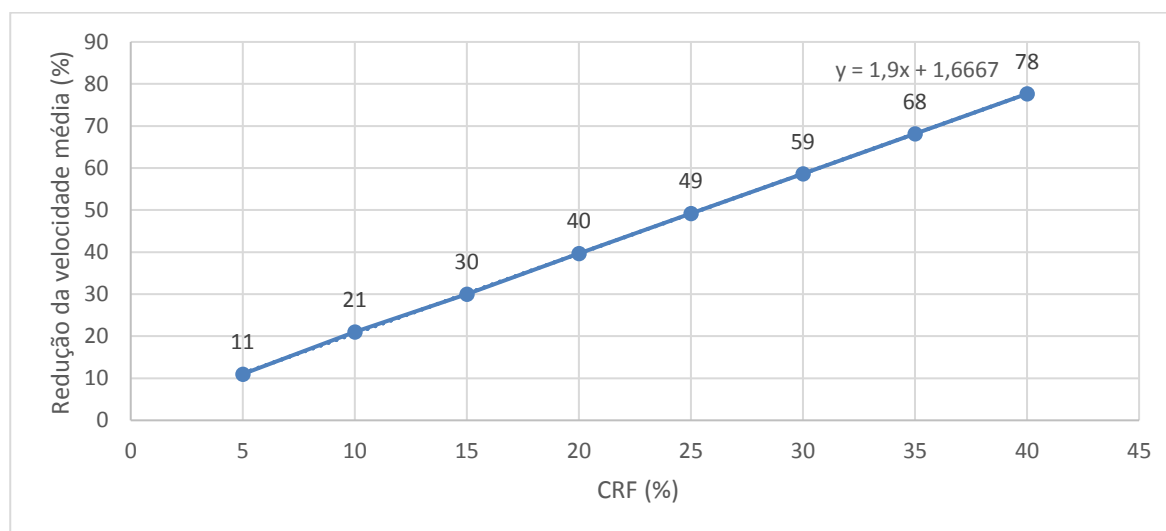


Figura 47- Gráfico de redução de velocidade média e CRF

O segundo valor do CRF também teve em consideração a tabela 8 só que desta vez utilizou-se a “redução do limite 50 para 40 km/h”. Considerou-se este valor visto que é o que mais se adequa às velocidades praticáveis onde se pretende implementar o PEH, isto é, meio urbano. Então considerando a diminuição de 40% da velocidade do veículo supondo que este circulava a 50km/hora, obtém-se neste caso uma redução de 50 para 30 km/h, ou seja, o dobro da variação de velocidade correspondente a 50 para 40 km/h. Assumindo que esta variação se mantém proporcional, neste caso o valor de CRF será o dobro de 34% ou seja 68%.

Tabela 9 - Redução do limite e CRF

Redução do limite (km/h)	Variação da velocidade (km/h)	CRF (%)
50 para 40	10	34
50 para 30	20	68

O terceiro valor teve em consideração a figura 49 referida já anteriormente como figura 14 do capítulo 2 desta dissertação. Partindo deste gráfico, uma vez que a alteração de 30% na velocidade média corresponde a aproximadamente a uma alteração de 55% no número de acidentes, e assumindo que o sistema PEH proporciona uma alteração da velocidade média de 40%, obtém-se pelo gráfico na linha relativa às “colisões com lesões” o valor de 80%.

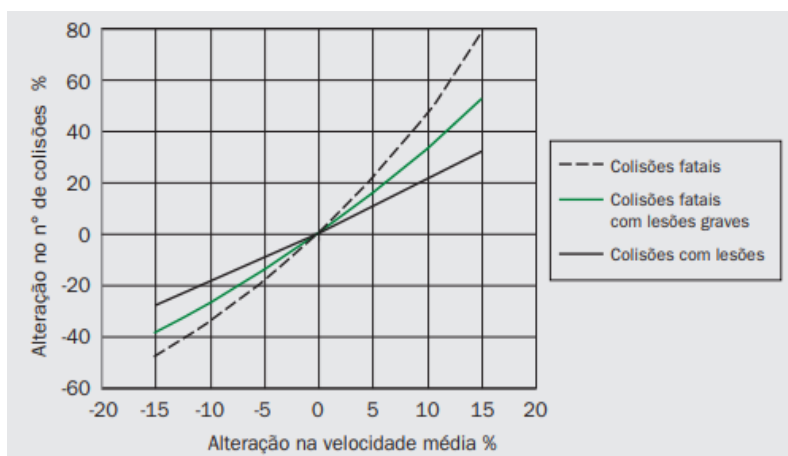


Figura 48 – Ilustração do modelo Power e da relação entre o percentual de alteração na velocidade e o percentual de alteração no número de colisões (WHO, 2008)

Tabela 10 - Alteração da velocidade média e CRF

Alteração da velocidade média (%)	CRF (%)
30	55
40	80

Por último, para a obtenção do quarto valor, utilizou-se a relação já anteriormente mencionada no capítulo 2, na secção do excesso de velocidade que menciona que a diminuição de aproximadamente 1,6 km/hora está associada a uma diminuição de 5% na frequência de acidentes (Taylor, Lynam e Baruya, 2000). Deste modo a diminuição de 20 km/hora (que corresponde a diminuir 40% da velocidade do veículo quando circula a 50km/hora) corresponde a uma diminuição de 62,5% na frequência de acidentes. Além de se verificar o impacto na redução de acidentes também se analisou o impacto que uma redução de 20 km/hora teria a nível da fatalidade a partir de uma relação que provém das curvas S. Esta relação indica que a diminuição de 1km/hora reduz 3,5% a probabilidade de fatalidade (Hussain et al., 2019). Por isso, a redução de 20 km/hora corresponde a uma redução de 70% na probabilidade de fatalidade.

Tabela 11- Relação velocidade e acidente

Relação velocidade e acidente	
Diminuição de 1,6 km/h	Reduz 5% a probabilidade de acidente
Diminuição de 50 para 30 km/h	62,5%

Tabela 12 - Relação velocidade e fatalidade

Relação velocidade e fatalidade	
Diminuição de 1 km/h	Reduz aproximadamente 3,5% a probabilidade de fatalidade
Diminuição de 50 para 30 km/h	70%

Ao nível da sinalização horizontal e vertical, após uma pesquisa de estudos que relacionassem estas medidas com a frequência de acidentes, apenas se obteve resultados para a sinalização horizontal, ou seja marcador de estrada. Contudo, este estudo, descrito mais acima no capítulo 5, só relaciona a eficácia desta medida com a velocidade, não apresentando qualquer valor para o impacto que tem nos acidentes. Desta forma, estabeleceu-se uma relação da velocidade com os acidentes a partir das relações anteriormente anunciadas. Sendo assim, a partir do estudo realizado por Patella et al. (2020) foi possível tirar a conclusão que as presenças de marcadores de iluminação de estrada reduzem a velocidade dos veículos em aproximadamente 19,3%. Aplicando a proporcionalidade dos valores de acordo com o anteriormente descrito, obteve-se os resultados apresentados na tabela 13.

Tabela 13- Resultados da redução de acidentes e fatalidades segundo a iluminação horizontal

Velocidade inicial (km/h)	Redução 19,3%	Velocidade final (km/h)
50	9,65	40,35
Redução na probabilidade de acidentes = 30,2%		
Redução na probabilidade de fatalidade = 33,8%		

De salientar que não foram encontrados estudos que relacionassem o efeito da iluminação pública inteligente, ou seja, iluminação que se liga quando deteta um peão a atravessar a passadeira com a frequência de acidentes ou com a redução da velocidade.

Seguidamente, é apresentado uma tabela resumo com os respetivos valores de diminuição da frequência de acidentes e diminuição da probabilidade de fatalidade de acordo com o controlo de velocidade proveniente do sistema implementado no pavimento e de acordo com a sinalização horizontal com LED existente na passadeira.

Tabela 14 – Tabela resumo

Controlo de Velocidade		Sinalização horizontal com LED	
CRF (%)	Fatalidade (%)	CRF (%)	Fatalidade (%)
78	70	30,2	33,8
68			
80			
62,5			

Posto isto, e uma vez que não se conhece qual será a interação entre estes dois sistemas quando aplicados em simultâneo, o que se pode concluir sobre o sistema PEH de acordo com a metodologia aplicada é que este apresenta valores de potencial para a redução da velocidade entre 62,5 e 80 e apenas um valor para a sinalização horizontal com LED, 30,2. Desta forma, considerando o pior cenário e assumindo a soma direta da potencialidade dos dois sistemas, esperar-se-á que este diminua a frequência de acidentes em 92,7% e a probabilidade de fatalidade associada aos acidentes em 103,8%. Considerando o melhor cenário, esperar-se-á uma redução da frequência de acidentes em 110,2% e a probabilidade de fatalidade associada aos acidentes em 103,8%, igual ao pior cenário.

Tabela 15 - Resultados da metodologia de cálculo da eficácia do sistema PEH

	Redução de acidentes (%)	Redução de fatalidade (%)
1	$62,5 + 30,2 = 92,7$	$70 + 33,8 = 103,8$
2	$68 + 30,2 = 98,2$	
3	$78 + 30,2 = 108,2$	
4	$80 + 30,2 = 110,2$	

Da tabela 15 conclui-se que o sistema PEH, combinando as características de redução autónoma da velocidade com a sinalização horizontal da passadeira, apresenta sempre valores próximos ou superiores a 100%, demonstrando que este sistema apresenta um elevado potencial de eficácia na redução de acidentes e fatalidade, nomeadamente a nível dos atropelamentos. Independentemente do cenário, o sistema PEH tem valores bastante superiores às várias medidas estudadas ao longo deste trabalho.

6.2 METODOLOGIA PARA ESTIMAR A EFICÁCIA DO SISTEMA PEH APÓS IMPLEMENTAÇÃO

Com a pesquisa dos diversos estudos resumidos no capítulo 5 foi possível identificar metodologias de estudo da eficácia de medidas similares ao sistema PEH. Assim, verificou-se que para avaliar a eficácia de uma dada medida na segurança rodoviária não basta ter em conta o número de acidentes antes e depois de a implementar e dessa diferença retirar um suposto valor para a eficiência da medida. Apesar da observação do número de acidentes ser bastante importante é ainda necessário ter em conta outras variáveis de exposição que influenciam o aumento ou diminuição da frequência de acidentes como é o caso por exemplo do volume de tráfego, da população e o uso de transportes públicos ou o uso de modos suaves de circulação. Pela análise desses mesmos estudos, concluiu-se ainda que a avaliação da medida não deve ser pontual, ou seja, verificar apenas o impacto da medida no local onde esta está implementada. É necessário também verificar a envolvente de forma a avaliar se os acidentes não poderão ter sido transferidos para outra zona.

Assim, a metodologia proposta neste estudo pretende estimar o número de acidentes esperado para um dado ano tendo em consideração o número de acidentes no ano anterior e as seguintes variáveis: volume de tráfego, densidade populacional e densidade dos serviços de transportes públicos. Para tal, foi essencial identificar artigos científicos que mostrassem relações matemáticas entre as variáveis de exposição mencionadas e a frequência de acidentes. A estas relações resultantes de regressões matemáticas também se podem denominar por elasticidades.

A partir o estudo de Zhou and Virginia P. Sisiopiku (1997), foi possível obter uma relação entre a variável volume de tráfego e o número de acidentes. No caso das variáveis população e transportes públicos, obteve-se a partir do estudo Lasse Fridstrom (1999) as elasticidades que representam a relação entre estas variáveis e o número de acidentes.

Para as variáveis de exposição referidas, e com base nos referidos estudos obteve-se os seguintes valores:

- O aumento de 1% na densidade dos transportes públicos corresponde a um aumento de 0,243% nos acidentes.
- O aumento de 1% na densidade populacional corresponde a um aumento de 0,656% nos acidentes.
- O aumento de 1% no volume dos veículos corresponde a um aumento de 2,195% nos acidentes.

Para este último valor, e uma vez que o estudo de Zhou and Virginia P. Sisiopiku (1997) mostrava o gráfico da relação entre volume/capacidade e número de acidentes, calculou-se a variação no número de acidentes correspondente ao aumento de 1% do volume de veículos (considerando a capacidade constante).

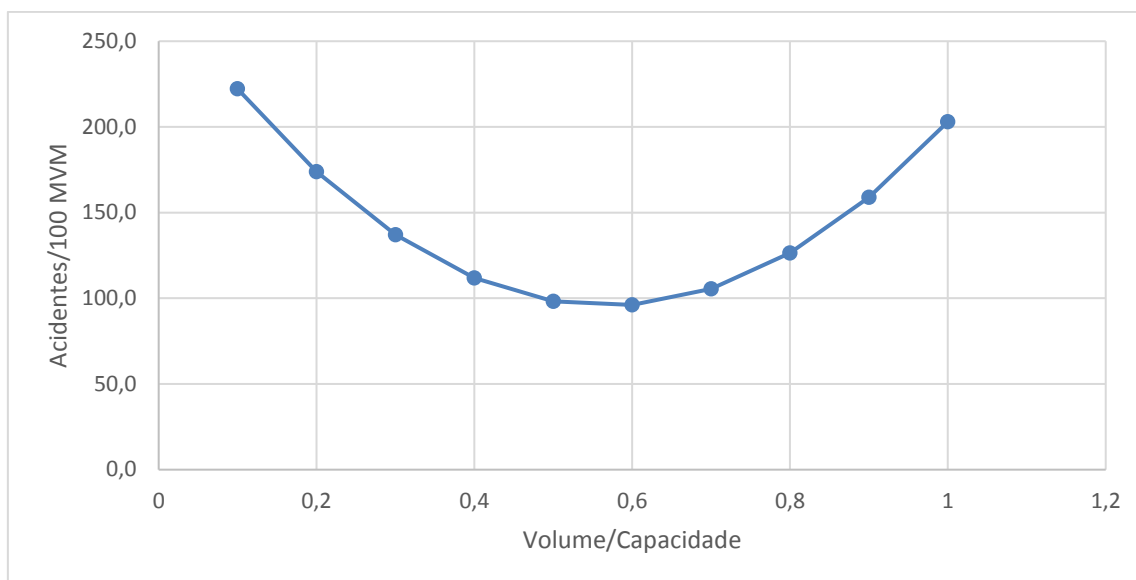


Figura 49 - Gráfico acidentes e volume/capacidade, adaptado de (Zhou e Sisiopiku, 1997)

Tabela 16 - Relação volume de tráfego e acidentes

Aumento de 1% no número de veículos	Supondo C=100	$y = 577x^2 - 656x + 282$	Taxa de crescimento = 2,195
90 veículos	0,9	158,97	
90,9 veículos	0,909	162,4601	

Assim com base no conhecimento do efeito da variação das variáveis de exposição na frequência dos acidentes, desenvolveu-se uma equação considerando que o efeito da variação destas variáveis tem o mesmo peso na frequência de acidentes. A equação (2) permite calcular o número de acidentes esperado para o ano i tendo em conta o ano anterior somando o efeito da variação das variáveis de exposição.

$$y_i = y + \left[\frac{(\Delta P \times a) + (\Delta Vt \times b) + (\Delta TP \times c)}{100} \right] \times y \quad (1)$$

Onde:

a - Coeficiente da densidade populacional, $a=0,656$

b - Coeficiente do volume de tráfego, $b=2,195$

c - Coeficiente da densidade dos serviços de transporte público, $c=0,243$

ΔP - Variação da densidade populacional (%)

ΔVt - Variação do volume de tráfego (%)

ΔTP - Variação da densidade dos serviços de transporte público (%)

y - Número de acidentes no ano anterior

Ou seja, aplicando a equação (2) com os respectivos coeficientes, obtém-se:

$$y_i = y + \left[\frac{(\Delta P \times 0,656) + (\Delta Vt \times 2,195) + (\Delta TP \times 0,243)}{100} \right] \times y \quad (2)$$

Assim, a equação (3) permite calcular o número de acidentes para o ano i a partir do ano de referência y , incluindo o efeito da variação da exposição. Se considerarmos que o ano i é o ano após implementação da medida e consequentemente neste ano é já possível de observar o seu efeito, então a diferença entre y_i e o número registado de acidentes para esse ano corresponde ao efeito real da medida. A metodologia pode-se ser descrita simplificada na tabela 17.

Tabela 17 - Tabela exemplo para avaliar a eficácia do sistema PEH

Ano 0	Ano 1		Contribuição do sistema
Número de acidentes	Número de acidentes esperado	Número de acidentes real	
Y (Valor de referência)	Y_i (Valor calculado com a equação 3)	Y_r (valor obtido pelos registos oficiais)	$Y_i - Y_r$ (diferença entre o esperado e o real)

De forma a tornar mais elucidativo a metodologia proposta para estimar o número de acidentes apresenta-se a seguir a título exemplificativo diferentes cenários em que cada um deles corresponde à variação de 5% das variáveis de exposição, sendo que o último cenário corresponde à variação conjunta dessas mesmas variáveis no valor de 5%.

Cenário 1: Considerando que o número de acidentes no ano 0 num dado local corresponde a 10 e supondo que os valores das elasticidades são os seguintes:

- Variação da densidade populacional = 5%
- Variação do volume de tráfego = 0%
- Variação da densidade dos serviços de transporte público = 0%

Assim sendo, através da expressão anteriormente referida, o número de acidentes esperado no ano 1 nesse mesmo local corresponde a 10,328.

De forma a avaliar a contribuição real do sistema PEH deve-se comparar o número esperado de acidentes com o número real observado nesse local após a implementação do sistema. Supondo que o número real de acidentes corresponde a 10, 8 e 12 (3 situações distintas) as contribuições do sistema podem ser calculadas de acordo com a tabela 18.

Tabela 18 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 1

Ano 0		Ano 1		Número de acidentes	Contribuição do sistema (%)
Número de acidentes	Número de acidentes esperado	Número de acidentes real			
10	10,328	10	-0,328		3,2
		8	-2,328		22,5
		12	+1,672		-16,2

Cenário2: Considerando que o número de acidentes no ano 0 num dado local corresponde a 10 e supondo que os valores das elasticidades são os seguintes:

- Variação da densidade populacional = 0%
- Variação do volume de tráfego = 5%
- Variação da densidade dos serviços de transporte público = 0%

O valor do número esperado de acidentes neste caso corresponde a 11,098. E realizando a verificação da contribuição real de uma dada medida, para esta situação, é possível obter os seguintes resultados:

Tabela 19 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 2

Ano 0		Ano 1		Número de acidentes	Contribuição do sistema (%)
Número de acidentes	Número de acidentes esperado	Número de acidentes real			
10	11,098	10	-1,098		9,9
		8	-3,098		27,9
		12	+0,902		-8,1

Cenário3: Considerando que o número de acidentes no ano 0 num dado local corresponde a 10 e supondo que os valores das elasticidades são os seguintes:

- Variação da densidade populacional = 0%
- Variação do volume de tráfego = 0%
- Variação da densidade dos serviços de transporte público = 5%

O valor do número esperado de acidentes neste caso corresponde a 11,098. E realizando a verificação da contribuição real de uma dada medida, para esta situação, é possível obter os seguintes resultados:

Tabela 20 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 3

Ano 0		Ano 1		Número de acidentes	Contribuição do sistema (%)
Número de acidentes	Número de acidentes esperado	Número de acidentes real			
10	10,122	10	-0,122	1,2	
		8	-2,122	21,0	
		12	+1,878	-18,6	

Cenário4: Considerando que o número de acidentes no ano 0 num dado local corresponde a 10 e assumindo que os valores das elasticidades são os seguintes:

- Variação da densidade populacional = 5%
- Variação do volume de tráfego = 5%
- Variação da densidade dos serviços de transporte público = 5%

O valor do número esperado de acidentes neste caso corresponde a 11,547. Realizando a verificação da contribuição de uma dada medida, para esta situação, é possível obter os seguintes resultados:

Tabela 21 – Estimativa da contribuição do sistema PEH – cenário 4

Ano 0		Ano 1		Número de acidentes	Contribuição do sistema (%)
Número de acidentes	Número de acidentes esperado	Número de acidentes real			
10	11,547	10	-1,547	13,4	
		8	-3,547	30,7	
		12	+0,453	-3,9	

Apresenta-se a seguir o cálculo da redução do custo de acidentes associado ao efeito das diferentes medidas de acalmia de tráfego para salientar o impacto das mesmas, tendo como base os valores dos CRF de cada medida.

Considerou-se as seguintes medidas com valores médios de eficácia obtido a partir da tabela 8:

- Lombas – CRF= 54,8%
- Pavement Energy Harvesting – CRF= 90,1%

- Sinalização – CRF=24%

Para o cálculo do custo *i* considerou-se que cada acidente com vítimas custa em média 60.491 euros (Santos, 2012).

Com base nestes valores, obtiveram-se os resultados que constam da tabela 22. Da análise destes resultados pode-se concluir que o sistema PEH apresenta uma redução do número de acidentes e dos respetivos custos associados muito superior quando comparado com as outras medidas. Por outro lado, mesmo que tenha um custo inicial superior a essas medidas o retorno do investimento desta solução é muito maior.

Tabela 22 -Redução do número de acidentes e dos custos de acidente de acordo com as medidas selecionadas

Medida	Número de acidentes esperado	CRF (%)	Redução do número de acidentes	Número de acidentes final	Redução do custo acidente (€)
Lombas	11,547	54,8	6,328	5,219	382,787
Pavement Energy Harvesting		90,1	10,404	1,143	629,348
Sinalização		24	2,771	8,776	167,621

7

CONCLUSÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

7.1 CONCLUSÕES FINAIS

Sendo os acidentes rodoviários a oitava causa de morte a nível mundial e sendo estes responsáveis por cerca de 1,35 milhões de mortes por ano tornando-se a principal causa de morte para crianças e jovens com idades compreendidas os 5 e 29 anos, estes devem ser tidos em apreço pelas autoridades responsáveis. A maior parte dos acidentes com peões ocorrem dentro das localidades e a velocidade excessiva dos veículos é um dos principais fatores desses sinistros. Assim sendo as medidas de acalmia de tráfego surgem como forma de solucionar esse problema. Contudo, é ainda possível contribuir para a maior eficácia das medidas de acalmia de tráfego com vista a atingir zero mortos (Visão Zero) sendo necessário a criação e/ou desenvolvimento de medidas inovadoras capazes de proteger os utentes mais vulneráveis, ou seja, os peões e diminuir dessa forma o número de atropelamentos.

Tendo isto em conta isto, a empresa Pavnext está a desenvolver um sistema modular de *Pavement Energy Harvesting*, PEH, capaz de reduzir a velocidade dos veículos independentemente da decisão do condutor, aproveitando essa energia mecânica do veículo para produzir energia elétrica. Além disso, contrariamente às lombas redutoras de velocidade também pretende reduzir o ruído e o desconforto provocado no condutor ao atravessar o sistema. A energia gerada é ainda utilizada para iluminar mercadores LED junto a passadeiras de forma interativa, maximizando a segurança rodoviária do local.

De forma a perceber a potencialidade deste sistema foi calculado um coeficiente de redução de acidentes, CRF, com base nas medidas de acalmia de tráfego já existentes e que se assemelham ao PEH. Neste cálculo da eficácia do PEH apenas foi contabilizado o valor de CRF do controlo de velocidade devido à componente do pavimento do sistema e dos marcadores de estrada, não tendo qualquer valor referente à iluminação pública inteligente. Para tal, foi realizada uma pesquisa quer de sistemas inovadores quer de estudos anteriores sobre o efeito e metodologias de estudo de medidas de acalmia de tráfego.

Assim, com base nos valores de outras medidas e considerando a metodologia proposta foi obtido um coeficiente de redução de acidentes correspondente a 90,1% e uma redução de fatalidades equivalente a 90,3%. Concluindo que o PEH, de acordo com estes dois parâmetros, tem uma contribuição bastante positiva na segurança rodoviária e superior a todas as medidas estudadas ao longo do trabalho.

Por outro lado, nesta dissertação, propõe-se uma formulação capaz de obter o número esperado de acidentes para um dado ano tendo em conta algumas variáveis de exposição tais como a variação da densidade populacional, do tráfego e do uso de transportes públicos e modos suaves de circulação do

local ou zona onde se vai implementar o sistema,. Com a formulação proposta é possível estimar a frequência de acidentes e após a implementação de uma dada medida contabilizar a contribuição real dessa mesma medida.

Concluiu-se assim que o PEH é uma medida inovadora com bastante potencial para a segurança rodoviária a nível nacional como internacional. No entanto, é indispensável a continuidade do seu desenvolvimento e da realização de casos práticos que possam validar o que foi enunciado no âmbito deste trabalho. E com isto, esta solução poderá tornar-se uma alternativa viável às lombas redutoras de velocidade.

7.2 PERSPETIVAS FUTURAS

Esta dissertação pretende estabelecer um passo importante no sentido de se averiguar a eficácia do sistema modular *Pavement Energy Harvesting* e na avaliação da contribuição real das medidas de acalmia de tráfego quando implementadas num dado local. Assim sendo, este estudo deve evoluir em várias vertentes.

Primeiramente, é necessário todas as melhorias e alterações de forma a que o PEH apresente todas as funcionalidades e propriedades já descritas neste trabalho. Além disso, é fundamental a instalação de um sistema de armazenamento de energia de maneira a que a geração de energia elétrica atinja um nível de conservação mais eficaz. Para tal, também se sugere a continuidade de ensaios experimentais e se possível com a extensão total do pavimento. Só depois de ultrapassada esta fase de desenvolvimento do sistema, será possível avançar para a sua implementação no meio urbano e assim aprofundar o estudo apresentado neste documento.

A partir do estudo realizado, sugere-se que o valor do CRF do sistema PEH tenha em consideração a iluminação inteligente, uma vez que até à data não foi possível encontrar estudos que relacionassem essa medida com os acidentes. Além disto, para tornar este valor o mais sólido possível e quando o PEH se encontrar finalizado aconselha-se o estudo de um caso prático, ou seja, um estudo antes e depois da implementação do sistema modular averiguando o número de acidentes bem como outras variáveis que apresentam efeito nos acidentes como é o caso das variáveis de exposição .De salientar que a metodologias apresentada tem a vantagem de ser de simples aplicação contudo, no futuro sugere-se o desenvolvimento de formulações mais complexas com suporte em modelos estatísticos mais robustos.

Futuramente, e após a finalização do sistema, será essencial refletir sobre a sua integração na legislação nacional e internacional e limitações e considerar acerca da sinalização deste modelo inovador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://www.wattwaybycolas.com/en/the-solar-road.html>>].
- AFESP (2020) - A MATURIDADE DA SINALIZAÇÃO E SEGURANÇA RODOVIÁRIA EM PORTUGAL [Consult. 19/05/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.afesp.pt/admin/ficheiros/20200115_seguranca_rodoviaria_relatorio.pdf>].
- ALJANAHI, AAM; RHODES, AH; METCALFE, Andrew V (1999) - Speed, speed limits and road traffic accidents under free flow conditions. Accident Analysis & Prevention [Em linha]. 31:1-2. 161-168. ISSN 0001-4575.
- ALMEIDA, Andreia Raquel Santos (2004) - Análise das condições de aplicabilidade de medidas de acalmia de tráfego. Porto: Universidade do Porto.
- ANSR (2018) - Relatório Anual de Sinistralidade Rodoviária Disponível em WWW: <URL: <http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Pages/default.aspx>>].
- (2019) - Sinistralidade Rodoviária Disponível em WWW: <URL: <http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Pages/default.aspx>>].
- AUTOMONITOR (2016) - Actibump: O revolucionário redutor de velocidade sueco. Automonitor [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://automonitor.sapo.pt/2016/08/19/novidades/noticias/actibump-o-revolucionario-redutor-de-velocidade-sueco-com-video/>>].
- BADENNOVA (2015) - Twitter. Disponível em WWW: <<https://twitter.com/badennova>>].
- BADENNOVASL (2013) - Baden Inteligente de Velocidad (BIV) - Español. YouTube. Disponível em WWW: <<https://www.youtube.com/watch?v=GfOyvXRmqzk>>].
- BOTTESINI, Giovani; NODARI, Christine Tessele (2008) - O fator humano nos acidentes rodoviários: motivos e possíveis soluções levantados em um grupo focado. 2008.
- CARVALHO, João Peixoto (2019) - Estudo do Potencial Impacto de um Sistema de Pavement Energy Harvesting na Segurança Rodoviária. [Em linha].
- CEUNYNCK, De (2017) - Installation of section control & speed cameras [Em linha]. [Consult. 21/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Installation_of_section_control_speed_cameras_23_102017.pdf>].
- CHAPMAN, Anthony [et al.] (1982) - O comportamento da criança enquanto peão. Análise Psicológica [Em linha]. 3: 169-176. ISSN 0870-8231.
- COELHO, Margarida Maria Matos (2011) - Os peões e a mobilidade urbana.
- COMISSÃO EUROPEIA (2020) - Excesso de Velocidade [Em linha]. [Consult. 04/05/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/behaviour/speeding_pt>].

- DANIELS, Focant (2017) - Dynamic Speed Display Signs [Em linha]. [Consult. 21/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Dynamic Speed Display Signs 26072017.pdf>>.
- DE CEUNYNCK, T., Focant, N. (2017) - Installation of lighting & Improvements to existing lighting [Em linha]. [Consult. 03/04/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Installation of lighting Improvements to existing lighting 23102017.pdf>>.
- DUARTE, Francisco João Anastácio (2018) - Pavement energy harvesting system to convert vehicles kinetic energy into electricity. 00500:: Universidade de Coimbra.
- EDEVA (2017) - Traffic systems for a liveable city [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.edeva.se/en/>>.
- EURONEWS (2014) - Tecnologia: Trava e produz energia. Euronews [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://pt.euronews.com/2014/09/03/tecnologia-trava-e-produz-energia>>.
- EUROPEAN ROAD SAFETY OBSERVATORY (2018) - Annual Accident Report 2018 Disponível em WWW: <URL: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf>.
- FRANK GROSS, Bhagwant Persaud, and Craig Lyon (2010) - A Guide to Developing Quality Crash Modification Factors [Consult. 1/06/2020].
- GOLDENBELD, Schermers (2017) - School zones [Em linha]. [Consult. 20/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/School_zones_24052017.pdf>.
- GOLSON, Jordan (2016) - World's first 'solar panel road' opens in France. Disponível em WWW: <<https://www.theverge.com/2016/12/22/14055756/solar-panel-road-electricity-france-normandy>>.
- GOMES, André (2020) - ONU: todos os países devem lutar contra mortes evitáveis no trânsito [Em linha]. [Consult. 04/05/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.circulaseguro.pt/onu-todos-os-paises-devem-lutar-contra-mortes-evitaveis-no-transito/>>.
- GUIMARÃES, Município de (2018) - Passadeiras seguras e inteligentes com novo sistema instalado em Guimarães [Em linha]. [Consult. 03/04/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.cm-quimaraes.pt/pages/1418?news_id=3738>.
- HEWITT, Cooper (2018) - SOLAR ROADWAYS PANELS [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://collection.cooperhewitt.org/objects/2318795878/>>.

- HUANG, H [et al.] (1999) - AN EVALUATION OF THE LIGHTGUARD (TRADEMARK) PEDESTRIAN CROSSWALK WARNING SYSTEM Disponível em WWW: <URL: <http://www.dot.state.fl.us/safety/4-Reports/Bike-Ped/lqresrch.pdf>>.
- HUSSAIN, Qinaat [et al.] (2019) - The relationship between impact speed and the probability of pedestrian fatality during a vehicle-pedestrian crash: A systematic review and meta-analysis. Accident Analysis & Prevention [Em linha]. 129: 241-249. ISSN 0001-4575.
- ISASTUR (2013) - VIVADEN en acción. YouTube. Disponível em WWW: <https://www.youtube.com/watch?v=6LgLi_6XZoM>.
- JATEIKIENÉ, Laura [et al.] (2016) - Impact assessment of speed calming measures on road safety. Transportation research procedia [Em linha]. 14: 4228-4236. ISSN 2352-1465.
- LEBLUD (2017) - Reduction of speed limit [Em linha]. [Consult. 21/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Reduction_of_speed_limit_19102017.pdf>.
- MACHAVA, Esperança José Paulo (2011) - Caracterização da sinistralidade rodoviária, na província de Maputo: estrada nacional nº1 - Moçambique. Lisboa INSTITUTO SUPERIOR DE CIÊNCIAS POLICIAIS E SEGURANÇA INTERNA.
- MAKO, Emese (2015) - Evaluation of human behaviour at pedestrian crossings. 2015. IEEE. ISBN 1467381292.
- NAMBISAN, Shashi S [et al.] (2009) - Effectiveness of automatic pedestrian detection device and smart lighting for pedestrian safety. Transportation research record [Em linha]. 2140:1. 27-34. ISSN 0361-1981.
- OFFICIALS, NACTO - National Association of City Transportation (2019) - Speed Cushion [Em linha]. [Consult. 15/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/street-design-elements/vertical-speed-control-elements/speed-cushion/>>.
- OLSZEWSKI, Piotr [et al.] (2015) - Pedestrian fatality risk in accidents at unsignalized zebra crosswalks in Poland. Accident Analysis & Prevention [Em linha]. 84: 83-91. ISSN 0001-4575.
- PATELLA, Sergio Maria [et al.] (2020) - The effect of a LED lighting crosswalk on pedestrian safety: some experimental results. Safety [Em linha]. 6:2. 20.
- PAU, Massimiliano; ANGIUS, Silvano (2001) - Do speed bumps really decrease traffic speed? An Italian experience. Accident Analysis & Prevention [Em linha]. 33:5. 585-597. ISSN 0001-4575.
- PAVEGEN (2019) - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://pavegen.com/>>.
- POWER, Underground (2011) - Il rallentatore che trasforma il traffico in energia [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.upgen.it/>>.

- QUIGLEY (2017a) - Implementation of 30-Zones [Em linha]. [Consult. 20/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Implementation_of_30Zones_231017.pdf>.
- (2017b) - Implementation of Narrowings [Em linha]. [Consult. 20/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Implementation_of_Narrowings_021117.pdf>.
- (2017c) - Implementation of Traffic Calming Schemes [Em linha]. [Consult. 20/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Implementation_of_Traffic_Calming_Schemes_231017.pdf>.
- (2017d) - Installation of Speed Humps [Em linha]. [Consult. 21/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.roadsafety-dss.eu/assets/data/pdf/synopses/Installation_of_Speed_Humps_231017.pdf>.
- ROTHMAN, Linda [et al.] (2015) - Installation of speed humps and pedestrian-motor vehicle collisions in Toronto, Canada: a quasi-experimental study. BMC public health [Em linha]. 15:1. 774. ISSN 1471-2458.
- SANTOS, Arlindo Alegre Donário e Ricardo Borges dos (2012) - Custo Económico e Social dos Acidentes de Viação em Portugal Lisboa Disponível em WWW: <URL: <http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/Publicacoes/Documents/Custo%20dos%20Acidentes%20de%20Via%C3%A7%C3%A3o%20-%20Miolo%20-%20FINAL12.pdf>>.
- SANTOS, Vanessa Carvalho (2014) - Aplicação de sistemas de geração de energia nos pavimentos rodoviários.
- SILVA, João Pedro da Cruz (2012) - Modelação e Avaliação do Potencial de Desempenho das Lombas Redutoras de Velocidade. Universidade de Coimbra.
- SILVA, João Pedro [et al.] (2013) - Modelação da velocidade em lombas isoladas. 2013.
- SOLARROAD (2020) - [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://en.solaroad.nl/>>.
- SOLMOVE (2017a) - Smart Solar Streets [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.solmove.com/en/>>.
- (2017b) - Solarstrassen [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://start-green.net/media/filer_public/f5/52/f5527355-9fe5-47aa-8cab-779e4958a999/solmove_pitchdeck_english_.pdf>.
- TAYLOR, Marie C; LYNAM, DA; BARUYA, A (2000) - The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents. Transport Research Laboratory Crowthorne.
- TOPEINTELIGENTE (2020) - TopelInteligente [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <http://inteligenciavial.mx/>>.

- TRANTER, Paul Joseph (2010) - Speed kills: The complex links between transport, lack of time and urban health. Journal of urban health [Em linha]. 87:2. 155-166. ISSN 1099-3460.
- TTS (2020) - Flex-drempel [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.ttsolutions.nl/flex-drempel/>>.
- V. KUDRYAVTSEV, Alexander [et al.] (2012) - Explaining reduction of pedestrian–motor vehicle crashes in Arkhangelsk, Russia, in 2005–2010. International journal of circumpolar health [Em linha]. 71:1. 19107. ISSN 2242-3982.
- VAZ, Luís Plácido Alves (2018) - Evolução da fiscalização e da sinistralidade grave associada ao excesso de velocidade.
- VIEIRA, Décio Nataniel Diogo da Silva (2008) - Medidas de acalmia de tráfego em zonas residenciais. Porto: Universidade do Porto.
- VIGNALI, Valeria [et al.] (2019) - Effects of median refuge island and flashing vertical sign on conspicuity and safety of unsignalized crosswalks. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour [Em linha]. 60: 427-439. ISSN 1369-8478.
- WANVIK, Per Ole (2009) - Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987–2006. Accident Analysis & Prevention [Em linha]. 41:1. 123-128. ISSN 0001-4575.
- WATTWAY (2019) - THE SOLAR ROAD [Em linha]. [Consult. 17/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.wattwaybycolas.com/en/the-solar-road.html>>.
- WEBER, Philip A (1998) - Towards a Canadian standard for the geometric design of speed humps. Carleton University.
- WHO (2008) - Speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners. [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43915/9789275317099_por.pdf>. ISSN 2940395047.
- (2013) - Pedestrian safety: a road safety manual for decision-makers and practitioners [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/79753/9789241505352_eng.pdf;jsessionid=F605F36BA55381A98444073742E79186?sequence=1>.
- (2018a) - Global status report on road safety
- (2018b) - Lesões no trânsito [Em linha]. [Consult. 23/03/2020]. Disponível em WWW: <URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries?fbclid=IwAR3lDwagfm29Re4B1_Zl-0RFu07agTGA6426F6mCwnD1O0KwRV-JzjmJPEk>.
- ZHOU, Min; SISIOPIKU, Virginia P (1997) - Relationship between volume-to-capacity ratios and accident rates. Transportation research record [Em linha]. 1581:1. 47-52. ISSN 0361-1981.

