



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Aplicação de Sistemas de Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Vanessa Carvalho Santos

Orientador

Professor Doutor Adelino Jorge Lopes Ferreira

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Colaboração Institucional



Coimbra, outubro, 2014

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto EMSURE - Energia e Mobilidade para Regiões Sustentáveis (CENTRO-07-0224-FEDER-002004) e do projeto MODAT - Sistema de Apoio à Decisão Multiobjectivo para Gestão de Infraestruturas Rodoviárias (PTDC/ECM/112775/2009).

Após a realização desta dissertação, não posso deixar de manifestar o meu profundo reconhecimento a um conjunto de pessoas que, dia após dia ou pontualmente, intervieram nesta caminhada, mas em particular:

Ao Professor Doutor Adelino Ferreira, pela sugestão do tema, pela sua competência e interesse demonstrado ao longo da sua orientação, bem como a sua disponibilidade sempre demonstrada.

Ao Eng.º Francisco Duarte, co-fundador da *Waydip*, pelo seu acompanhamento e disponibilidade, principalmente, na concretização do estudo de caso, e pelas suas valiosas sugestões, essenciais à realização da presente dissertação.

Ao Pedro, pela sua generosa amizade, pela sua ajuda e leitura crítica que certamente enriqueceu este trabalho, além do seu constante incentivo e encorajamento na fase final.

À minha família e amigos que sempre me apoiaram.

Por último, mas não menos importante, ao Ivan, o meu pilar.

RESUMO

O sistema *Waynergy Vehicles*, criado pela empresa *Waydip*, começou a ser desenvolvido em 2010, tendo como objetivo a geração de energia em pavimentos rodoviários. Uma vez que a energia mecânica proveniente do movimento dos veículos é convertida em energia elétrica, este sistema afigura-se como uma potencial alternativa aos meios convencionais de produção de energia. Recentemente, as características e método de funcionamento do sistema têm vindo a sofrer sucessivas alterações com o intuito de o aperfeiçoar e de o tornar mais económico.

Estando o sistema implementado na rede rodoviária, é da máxima importância que o material que constitui o revestimento dos módulos assegure aos utentes uma circulação segura, cómoda e económica, não negligenciando as características mecânicas que influenciam diretamente a eficiência do sistema.

Neste sentido, esta dissertação teve como objetivo principal estudar o material mais adequado para revestir cada módulo do sistema e fez-se incidir o estudo na modelação e avaliação do comportamento mecânico dos materiais do revestimento e na avaliação de duas características funcionais importantes, como o atrito e a textura, recorrendo à realização de ensaios como o Pêndulo Britânico e a Mancha de Areia.

Numa primeira fase, concluiu-se que a borracha é o material mais adequado para constituir a componente em estudo, dadas as suas propriedades físicas e mecânicas. Verificou-se ainda que fatores como o peso do veículo, a velocidade de circulação e o deslocamento vertical e comprimento da superfície também influenciam a captação e dissipação de energia.

A realização dos ensaios experimentais referidos permitiu concluir qual das três amostras de borracha fornecidas para o estudo poderá vir a ter um desempenho melhor.

ABSTRACT

The *Waynergy Vehicles* system created by the *Waydip* company started being developed in 2010, aiming to generate electrical energy in road surfaces. Once the kinetic energy from the movement of vehicles is able to be converted into electrical energy, this system appears to be a potential alternative to conventional means of energy production. Recently, the characteristics and the operating method of the *Waynergy Vehicles* system have been suffering successive changes in order to improve it and to make it more cost-effective.

With the system implemented on the road network, it is of the utmost importance that the material which forms the coating of the modules performs the functions that any conventional pavement should play, since this coating will be in direct contact with the tyres of the vehicles. This system component must then ensure a safety, comfortable and economic circulation of the users, not neglecting the mechanical characteristics that directly influence the efficiency of the system.

In this sense, this dissertation had as main objective to study the most suitable material to coat each system module and the study was made to focus on the evaluation of mechanical behavior of the coating materials and the evaluation of two important functional characteristics, such as friction and texture, using the British Pendulum and Sand Patch tests.

Initially, it was concluded that rubber is the most suitable material to form the surface coating of the modules, given its physical and mechanical properties. It was also demonstrated that factors such as weight, the vertical displacement and length of the surface, as well as the speed of vehicles, influence the uptake and dissipation of energy in the coating material.

The experimental tests allowed to conclude which one of the three rubber samples provided for the study has better performance.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento do Tema..... | 1 |
| 1.2 Estrutura da Dissertação | 2 |
| 2 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NOS PAVIMENTOS | 3 |
| 2.1 Aproveitamento da Energia Cinética e da Pressão dos Veículos | 4 |
| 2.1.1 Sistemas piezoelétricos..... | 4 |
| 2.1.2 Sistemas eletromecânicos | 6 |
| 2.1.3 Sistemas hidráulicos | 7 |
| 2.2 Aproveitamento da Energia Solar..... | 7 |
| 2.2.1 Sistemas fotovoltaicos | 7 |
| 2.2.2 Coletor solar asfáltico..... | 8 |
| 2.2.3 Geradores termoelétricos..... | 11 |
| 2.3 Considerações Finais | 12 |
| 3 MATERIAIS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS ... | 14 |
| 3.1 Materiais Utilizados em Pavimentos Rodoviários | 14 |
| 3.1.1 Misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste | 15 |
| 3.1.1.1 Betão betuminoso (BB) | 17 |
| 3.1.1.2 Betão betuminoso drenante (BBD) | 17 |
| 3.1.1.3 Betão betuminoso rugoso (BBR) e micro betão betuminoso rugoso (MBBR) | 17 |
| 3.1.2 Revestimento antiderrapante | 18 |
| 3.1.3 Granalhagem..... | 19 |
| 3.1.4 Marcas Rodoviárias | 20 |
| 3.1.4.1 Cor | 20 |
| 3.1.4.2 Visibilidade..... | 20 |
| 3.1.4.3 Durabilidade e desgaste | 21 |
| 3.1.4.4 Aderência..... | 21 |
| 3.2 Dispositivos Utilizados em Pavimentos Rodoviários..... | 23 |
| 3.2.1 Lombas redutoras de velocidade | 23 |
| 3.2.1.1 Domínio de Aplicabilidade..... | 25 |
| 3.2.1.2 Materiais | 26 |
| 3.2.2 Juntas de Dilatação em Obras de Arte..... | 27 |
| 3.2.1.1 Aço | 28 |
| 3.2.1.2 Elastómero | 28 |
| 4 ESTUDO DE CASO | 30 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Sistema de Geração de Energia Elétrica da Waydip | 30 |
| 4.1.1 Evolução das características dos módulos do sistema..... | 30 |
| 4.1.2 Descrição do modo de funcionamento do sistema | 31 |
| 4.1.3 Fatores que influenciam a geração de energia..... | 33 |
| 4.2 Materiais Mais Adequados Para Revestir a Superfície do Waynergy Vehicles..... | 33 |
| 4.2.1 Soluções testadas no Sistema Piloto..... | 34 |
| 4.2.2 Possíveis soluções alternativas | 38 |
| 4.2.2.1 Simulação da aderência e textura na placa de alumínio | 38 |
| 4.2.2.2 Aplicação de um revestimento antiderrapante sobre os módulos..... | 39 |
| 4.2.3 Importância do conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais | 40 |
| 4.3 Modelação do Comportamento do Material | 43 |
| 4.3.1 Análise aos resultados | 45 |
| 4.3.2 Considerações finais | 51 |
| 4.4 Estudo Experimental do Material Adotado com Equipamentos de Medida da Aderência | 52 |
| 4.4.1 Generalidades | 52 |
| 4.4.2 Descrição do material | 53 |
| 4.4.3 Ensaio com o Pêndulo Britânico | 53 |
| 4.4.4 Ensaio da Mancha de Areia | 55 |
| 4.4.5 Análise dos resultados obtidos | 57 |
| 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| 5.1 Conclusões..... | 59 |
| 5.2 Trabalhos Futuros | 60 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 62 |
| ANEXO A | 66 |
| ANEXO B | 67 |
| ANEXO C | 68 |
| ANEXO D | 69 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Deformação vertical associada e sensor piezoelétrico (Innowattech, 2014). | 4 |
| Figura 2.2 – Módulo piezoelétrico da Pavegen Systems (Pavegen, 2014). | 5 |
| Figura 2.3 – Pavimento piezoelétrico PIZO (Casimiro, 2014). | 5 |
| Figura 2.4 – Sistema Waynergy People (Duarte <i>et al.</i> , 2013). | 6 |
| Figura 2.5 – Pormenor dos pistões hidráulicos da <i>Kinergy Power</i> (Kinergy Power, 2014). | 7 |
| Figura 2.6 – Representação de um painel solar da <i>Solar Roadway</i> (Solar Roadways, 2014). | 8 |
| Figura 2.7 – Esquema do sistema SERSO na Suíça (<i>Pascual et al.</i> , 2008). | 9 |
| Figura 2.8 – Funcionamento do sistema RES: a) no inverno; b) no verão (<i>Pascual et al.</i> , 2008). | 10 |
| Figura 2.9 – Esquema de funcionamento do sistema <i>PGS</i> (PaveGuard, 2014). | 11 |
| Figura 2.10 – Representação de um módulo termoelétrico. | 11 |
| Figura 2.11 – Comparação da densidade de potência para quatro tipos de sistemas de geração de energia (<i>Xiong et al.</i> , 2012). | 12 |
| Figura 3.1 – Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário e ações atuantes. | 15 |
| Figura 3.2 – Configuração aproximada da distribuição de tensões verticais. | 15 |
| Figura 3.3 – Aplicação manual a frio de um revestimento antiderrapante (Neoasfalto, 2014). | 18 |
| Figura 3.4 – Pavimento antes e após a granalhagem e respetiva máquina granalhadora (Luso Granalhagem, 2014). | 19 |
| Figura 3.5 – Diferentes tipologias de lombas tradicionais: a) <i>Speed bump</i> ; b) <i>Speed hump</i> . | 24 |
| Figura 3.6 – Tipologias alternativas de lombas: a) Lomba do tipo almofada, <i>speed cushion</i> ; b) Lomba do tipo combinado (Steen e Hageback, 1999). | 24 |
| Figura 3.7 – Tipologia alternativa de lombas: a) Forma quadrilátera; b) Forma semiesférica (http://www.saspeedbumps.co.za). | 25 |
| Figura 3.8 – Forma das lombas contempladas na nota técnica da DGV (INIR, 2011). | 25 |
| Figura 3.9 – Exemplos de materiais utilizados em lombas: a) lomba em metal (Manutan, 2014); b) lomba em borracha de pneu reciclada (Ecoprodev, 2014); c) lomba em PVC (Sintimex, 2014). | 26 |
| Figura 3.10 – Exemplo de junta de dilatação (Lima e Brito, 2009). | 27 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 – Configuração inicial do módulo do sistema <i>Waynergy Vehicles</i> . | 31 |
| Figura 4.2 – Funcionamento do sistema <i>Waynergy Vehicles</i> . | 32 |
| Figura 4.3 – Energia gerada numa superfície plana. | 36 |
| Figura 4.4 – Energia gerada numa superfície côncava. | 36 |
| Figura 4.5 – Módulos do <i>Waynergy Vehicles</i> revestidos por LRV. | 37 |
| Figura 4.6 – Colocação das peças de betão armado no interior do pavimento. | 41 |
| Figura 4.7 – Curva tensão-deformação de uma borracha. | 42 |
| Figura 4.8 – Energia captada e perdida pelo material: a) $E=6,1$ MPa; b) $E=17,0$ MPa; c) $E=70,0$ GPa (para $v=50$ km/h; $L=0,20$ m; $h=15$ mm; $m=1350$ kg). | 45 |
| Figura 4.9 – Energia captada pela superfície para $m=1350$ kg, $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa. | 47 |
| Figura 4.10 – Energia perdida na borracha para $m=1350$ kg, $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa. | 48 |
| Figura 4.11 – Energia captada pela superfície: a) $h=15$ mm; b) $h=10$ mm. | 49 |
| Figura 4.12 – Energia absorvida pela borracha: a) $h=15$ mm; b) $h=10$ mm. | 49 |
| Figura 4.13 – Energia captada pela superfície: a) $m=900$ kg; b) $m=3500$ kg (para $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa). | 50 |
| Figura 4.14 – Energia absorvida pela borracha: a) $m=900$ kg; b) $m=3500$ kg (para $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa). | 51 |
| Figura 4.15 – Provetes laboratoriais: a) amostra 1; b) amostra 2; c) amostra 3. | 53 |
| Figura 4.16 – Pêndulo Britânico do Laboratório de Pavimentos Rodoviários. | 54 |
| Figura 4.17 – Ensaio da Mancha de Areia. | 56 |

ÍNDICE DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2. 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de geração de energia. | 13 |
| Quadro 3.1 – Resumo do domínio de aplicabilidade das lombas redutoras de velocidade. | 26 |
| Quadro 3.2 – Características dos materiais elastoméricos (EP, 2009) | 29 |
| Quadro 4.1 – Dados de entrada na modelação e respetivos valores. | 44 |
| Quadro 4.2 – Correção do <i>PTV</i> nos casos em que o ensaio é efetuado a temperaturas diferentes de 20°C quando é utilizado o patim 57. | 55 |
| Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico. | 55 |
| Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios da Mancha de Areia. | 57 |
| Quadro A.1 – Características das tintas implementadas em marcação rodoviária (Fichas Técnicas). | 66 |
| Quadro A.2 – Propriedades físicas e mecânicas de cada tipo de lomba (Fichas Técnicas). | 66 |
| Quadro B.1 – Propriedades físicas, químicas e tribológicas. | 67 |

SIMBOLOGIA

A – Área da seção

E – Módulo de Elasticidade ou de Young

E_c – Energia cinética

E_p – Energia potencial

F – Força exercida pelo veículo

h – Deslocamento vertical sofrido pela superfície do sistema

L – Comprimento da superfície

l_0 – Deslocamento vertical

m – Peso do veículo

PMT – Profundidade média da textura superficial

PTV – Pendulum Test Value

TMD_A – Tráfego Médio Diário Anual

v – Velocidade de circulação

σ – Tensão exercida

ε – Deformação

Δl – Variação da espessura do material

$\%E_{perdida}$ – Percentagem de energia perdida

ABREVIATURAS

3M – Minnesota Mining and Manufacturing Company
BB – Betão Betuminoso
BBD – Betão Betuminoso Drenante
BBR – Betão Betuminoso Rugoso
BR – Borracha de Polibutadieno
CE – Conformidade Europeia
CR – Borracha de Policlocopreno
CSA – Coletores Solares Asfálticos
CTM – Circular Texture Meter
DGV – Direção Geral de Viação
IR – Borracha de Polisopreno
JAE – Junta Autónoma de Estradas
LED – Light Emitting Diode
LRV – Lomba Redutora de Velocidade
FEUBI – Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior
MBBR – Micro Betão Betuminoso Rugoso
MR – Marcas Rodoviárias
NMR – Norma de Marcas Rodoviárias
PGS – Pave Guard System
PTFE – Politetrafluoretileno
PU – Borracha de Poliuretano
PVC – Policloreto de Polivinila
RES – Refrigeração de Estradas e Edifícios
RST – Regulamento de Sinalização do Trânsito
SBR – Borracha de Estireno Butadieno
SNSV – Sociedade Nacional de Sinalização Vertical
IPEG – Innowattech Piezo Electric Generator
TEGs – Thermoelectrical Generators
TNO – Organization for Applied Scientific Research

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

O tráfego rodoviário constitui atualmente uma das principais fontes de poluição do ar, principalmente em zonas urbanas, onde para além do crescente impacte ambiental provocado pela emissão de gases poluentes, existe ainda um impacte económico negativo devido ao aumento dos custos dos combustíveis fósseis.

Com base nos impactes descritos, têm vindo a surgir cada vez mais propostas por parte da comunidade científica no intuito de alterar o panorama mundial. Estas propostas têm o objetivo de minorar os efeitos nefastos da circulação automóvel, quer através do aproveitamento de energias renováveis, quer através do desenvolvimento de tecnologias inovadoras que permitam otimizar a produção de energia sem prejuízo para o meio ambiente e sem comprometer o desenvolvimento socioeconómico. Portugal é um dos países europeus preocupados com a mudança do paradigma energético, pelo que pretende estar, em 2020, entre os cinco maiores produtores de energias renováveis da Europa (Ferreira, 2012).

Neste contexto, face aos atuais volumes de tráfego rodoviário, a empresa portuguesa *Waydip* desenvolveu o sistema *Waynergy Vehicles* que visa utilizar o pavimento rodoviário para gerar energia elétrica a partir da energia dissipada pelos veículos que sobre ele se movimentam.

Além do desenvolvimento e aperfeiçoamento da componente eletromecânica do sistema, é igualmente importante estudar qual o material mais adequado para vir a constituir o revestimento da superfície do mesmo. É com base nesse estudo que a elaboração da presente dissertação foi pertinente.

Este trabalho de investigação centrou-se na avaliação do comportamento mecânico dos materiais para o revestimento dos módulos do sistema, no impacto da geometria da superfície, assim como do seu deslocamento vertical. Foi também avaliada a funcionalidade do sistema, determinando a resistência à derrapagem e a textura de amostras de borracha para constituírem o seu revestimento superficial. Estas características são cada vez mais valorizadas, decorrentes da procura de melhores condições de segurança, conforto e economia.

1.2 Estrutura da Dissertação

Para melhor compreensão e análise do estudo realizado, a presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos conforme a seguir apresentados:

No presente capítulo 1 é feito o enquadramento do tema desenvolvido e são apresentados os seus principais objetivos.

No capítulo 2 é feita uma síntese sobre os principais tipos de sistemas de geração de energia em pavimentos rodoviários, abordando a base de funcionamento e respectivas formas de captação de energia bem como o campo de aplicação da energia gerada por cada sistema. Posteriormente, é apresentado um estudo comparativo dos diferentes sistemas abordados, referindo as principais vantagens e limitações.

No capítulo 3 começa-se por apresentar uma breve síntese sobre pavimentos rodoviários referindo os materiais recorrentemente utilizados nas camadas de desgaste. Seguidamente são referidos os materiais habitualmente utilizados na camada superficial dos pavimentos e as técnicas mais recentes para lhes conferir maior atrito e textura: o revestimento antiderrapante e a granalhagem. São ainda apresentados os principais dispositivos utilizados, como as lombas e juntas de dilatação, evidenciando os materiais pelos quais são constituídos bem como o respetivo enquadramento legal.

O capítulo 4 apresenta o estudo de caso. Inicialmente é descrito o sistema de geração de energia elétrica *Waynergy Vehicles* quanto às suas características e método de funcionamento. Em seguida, são estudados os materiais mais adequados para servir de revestimento, tendo em conta as suas propriedades mecânicas e tendo por base uma modelação desenvolvida em Excel. Finalmente, são descritos os dois ensaios realizados com o intuito de avaliar a capacidade de aderência de três amostras de borracha, sendo apresentados e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões alcançadas mediante a utilização da referida modelação e da realização dos ensaios experimentais. Para finalizar propõem-se alguns estudos que poderão ser desenvolvidos no futuro.

2 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA NOS PAVIMENTOS

Atualmente, existe já uma vasta panóplia de meios de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como é o caso do aproveitamento dos recursos naturais como o vento, água, sol e marés. Contudo, as instalações onde se dá a geração deste tipo de energia são implementadas sobretudo no exterior das cidades e centros urbanos existindo a necessidade de assegurar o transporte eficaz e com o mínimo de perdas desde o local onde é gerada a energia para o local onde esta é consumida. Parte da energia gerada é dissipada no transporte e é no sentido de minimizar essas perdas que surge o conceito de “microgeração”, o qual consiste na produção de energia elétrica através de instalações de pequena escala usando fontes renováveis (energia solar e eólica) ou processos de conversão de elevada eficiência. Todavia, são sistemas que dependem exclusivamente de condições climáticas.

Face às crescentes necessidades de mobilidade, cujo panorama atual é marcado por elevadas percentagens de utilização automóvel, que depende fortemente do consumo de combustíveis fósseis contribuindo para os problemas ambientais e económicos já mencionados, surge a ideia de utilizar o pavimento rodoviário para gerar energia elétrica através de sistemas instalados nos próprios pavimentos, nos quais qualquer tipo de energia pode ser explorada, desde a energia solar e eólica à energia provocada pela pressão exercida pelos pneus dos veículos.

A função do pavimento rodoviário deixa assim de ser apenas funcional e estrutural, para ser também sustentável no que respeita à produção e armazenamento de energia elétrica e térmica que pode vir a ser utilizada na manutenção da própria infraestrutura rodoviária, nomeadamente em sistemas de iluminação, na gestão do tráfego (semáforos), no aquecimento e arrefecimento urbano, bem como no descongelamento dos pavimentos e ainda na alimentação de edifícios residenciais, comerciais e industriais.

O presente capítulo pretende, numa fase inicial, abordar sucintamente os vários sistemas de geração de energia em pavimentos rodoviários avaliando o funcionamento de cada um deles.

Posteriormente, é efetuado um estudo comparativo dos vários sistemas, destacando-se as principais vantagens e desvantagens de cada um deles.

2.1 Aproveitamento da Energia Cinética e da Pressão dos Veículos

2.1.1 Sistemas piezoelétricos

Este sistema tem como base de funcionamento a instalação de sensores piezoelétricos no pavimento, a partir dos quais é possível gerar energia elétrica bem como armazená-la através de condensadores, em resposta a uma pressão mecânica, aproveitando dessa forma a energia que geralmente é desperdiçada. O tipo e a magnitude da pressão exercida determinam o poder de produção de energia.

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado pela ação do tráfego e pela ação climática. A ação do tráfego, isto é, a carga dos veículos traduz-se numa pressão vertical na superfície do pavimento e numa ação tangencial aplicada no plano entre o pneu e pavimento, correspondente à reação necessária para o movimento do veículo. Durante o movimento do veículo a energia produzida na combustão é gasta sobretudo a superar a resistência ao rolamento sobre o pavimento, sendo outra parte da energia gasta aquando da pressão vertical que origina uma deformação no pavimento, onde a deformada resultante é proporcional ao peso do veículo e à rigidez da camada de desgaste como se pode verificar através da Figura 2.1.

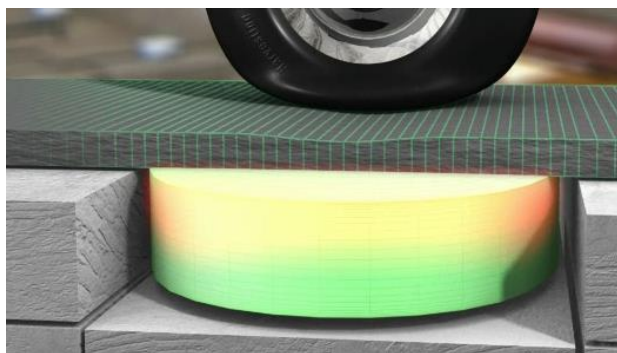


Figura 2.1 – Deformação vertical associada e sensor piezoelétrico (Innowattech, 2014).

A tecnologia descrita é designada por IPEG e foi desenvolvida pela empresa *Innowattech Ltd.* Esta tecnologia permite o aproveitamento e conversão da energia mecânica perdida durante o movimento dos veículos em energia elétrica que pode ser posteriormente utilizada na iluminação das estradas, alimentação de semáforos, sistemas de comunicação e sinalização rodoviária, bem como ser injetada na rede. O método de produção de energia é aplicável não só a pavimentos rodoviários, mas também em ferrovias e em movimentos de pessoas.

As vantagens dos sistemas piezoelétricos prendem-se sobretudo com o facto de não dependerem de fatores ambientais específicos como o sol ou o vento. O tempo de retorno do investimento é reduzido, cerca de dois anos. Porém, os sensores piezoelétricos, por si só, não têm grande capacidade de geração de energia elétrica, sendo necessário um grande número de sensores para gerar uma quantidade de energia considerável.

A par da *Innowattech*, surge em Inglaterra a empresa *Pavegen* com tecnologia renovável, cujo conceito foi desenvolvido por Laurence Kemball-Cook e consiste na captação da energia cinética desperdiçada pelo movimento pedonal, através do módulo da *Pavegen* (Figura 2.2) e, posteriormente, na sua conversão em energia elétrica que, à semelhança da tecnologia IPEG da *Innowattech*, pode ser armazenada e utilizada num vasto campo de aplicação (Pavegen, 2014).

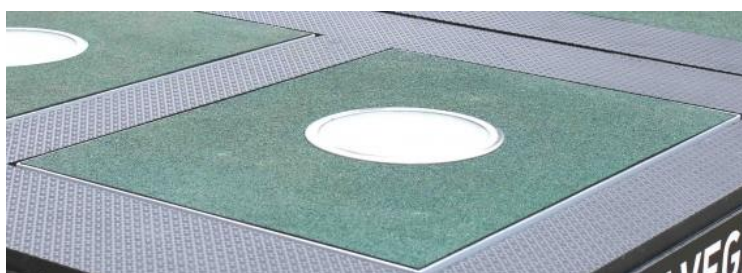


Figura 2.2 – Módulo piezoelétrico da Pavegen Systems (Pavegen, 2014).

O módulo tem uma dimensão de $60 \times 45 \times 9,7$ cm³ e a parte superior do revestimento é composta por material 100% de borracha reciclada.

Recentemente em Portugal, Casimiro (2014) desenvolveu o projeto de um pavimento piezoelétrico que conduziu à construção de um protótipo em miniatura, o PIZO (Figura 2.3). O mecanismo de geração é composto por uma sobreposição de geradores piezoelétricos ligados a uma massa com deslocamento vertical que prolonga a vibração e oscilação dos sensores, otimizando a produção de eletricidade aquando do movimento pedonal (Casimiro, 2014).

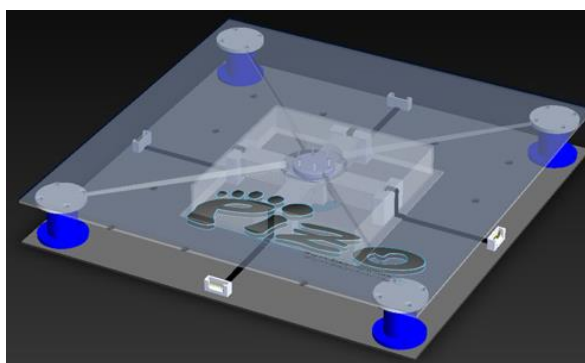


Figura 2.3 – Pavimento piezoelétrico PIZO (Casimiro, 2014).

2.1.2 Sistemas eletromecânicos

Em 2010, a empresa Waydip iniciou o projeto Waynergy, com o objetivo de desenvolver de dois produtos: *Waynergy Vehicles* e *Waynergy People*, pretendendo-se utilizar o movimento de veículos e pessoas, respetivamente, para deslocar, linearmente, a superfície do pavimento que é convertido num movimento rotacional através de um sistema mecânico, acionando um veio gerador, que gera a energia elétrica.

A primeira aplicação do sistema *Waynergy People* (Figura 2.4), teve lugar no pavimento da entrada principal da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior (FEUBI), o que tornou possível retirar algumas considerações quanto à geração de energia.

A abordagem ao sistema *Waynergy Vehicles*, será feita mais adiante no estudo de caso, onde serão analisados com maior pormenor as suas características e método de funcionamento, pois é o sistema para o qual se pretende estudar o revestimento que serve de base à realização da presente dissertação.



Figura 2.4 – Sistema Waynergy People (Duarte *et al.*, 2013).

Estudos realizados por Duarte e Casimiro (2011) levaram à conclusão que quanto maior for a carga, maior será a velocidade com que o sistema é acionado e, conseqüentemente, maior será a energia elétrica gerada. O local privilegiado de aplicação são locais com velocidades reduzidas, como locais onde existam lombas, passadeiras, portagens e zonas destinadas a estacionamento, sendo a energia gerada aproveitada para iluminação pública, semáforos, sinais de trânsito, entre outros.

Em outros países como os Estados Unidos da América e Itália têm sido desenvolvidos sistemas similares ao da *Waydip*, sendo que na Itália o projeto é implementado sob a forma de lomba.

2.1.3 Sistemas hidráulicos

Este sistema aproveita igualmente o peso dos veículos e a sua velocidade de circulação para a geração de energia elétrica. O sistema chama-se *Kinergy Power Carpet* e foi desenvolvido pela empresa americana *Kinergy Power*. A pressão exercida pelos veículos nos pistões hidráulicos provoca um deslocamento vertical que força um fluido hidráulico a passar através do sistema conduzindo dessa forma à produção de eletricidade, como se pode observar na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Pormenor dos pistões hidráulicos da *Kinergy Power* (Kinergy Power, 2014).

O sistema é colocado na superfície do pavimento e pode também funcionar como elemento de acalmia de tráfego, em zonas onde se pretende que sejam exercidas velocidades reduzidas como é o caso de locais limítrofes de escolas, cruzamentos, interseções e estacionamento.

2.2 Aproveitamento da Energia Solar

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos

Outra forma de aproveitamento de energia de forma sustentável utilizando o pavimento rodoviário tem vindo a ser desenvolvida pela empresa americana *Solar Roadway*. Consiste na instalação de painéis solares nos pavimentos rodoviários, substituindo as primeiras camadas do pavimento tradicional, permitindo assim a conversão de energia solar em energia elétrica.

O projeto liderado por Scott Brusaw é constituído por uma série de painéis solares estruturalmente dimensionados para suportar as cargas dos veículos. Cada painel individual é composto por três camadas: camada de superfície; camada eletrónica; e camada de base. A

camada de superfície, que estará em contacto com os pneus dos veículos, é fabricada num material vítreo de atrito melhorado e de alta resistência, comparáveis a um pavimento betuminoso e que portanto deverá resistir a cargas similares. Na camada intermédia, a camada eletrónica, são colocadas as células fotovoltaicas para a captação de energia solar e um sistema de LED's. A distribuição da energia elétrica é feita através da camada de base (terceira e última camada), possuindo ainda uma rede de fibra ótica destinada a comunicações (Duarte *et al.*, 2013; Solar Roadways, 2014).

A energia gerada pode ser utilizada na manutenção da própria infraestrutura viária, nomeadamente na alimentação de postes de iluminação pública e sinalização e também para alimentar edifícios residenciais, comerciais e industriais ligados ao sistema *Solar Roadway*.

Estes painéis, para além da produção de energia, podem alojar matrizes LED, que podem substituir a sinalização horizontal, dispensando a necessidade de pinturas (Figura 2.6).

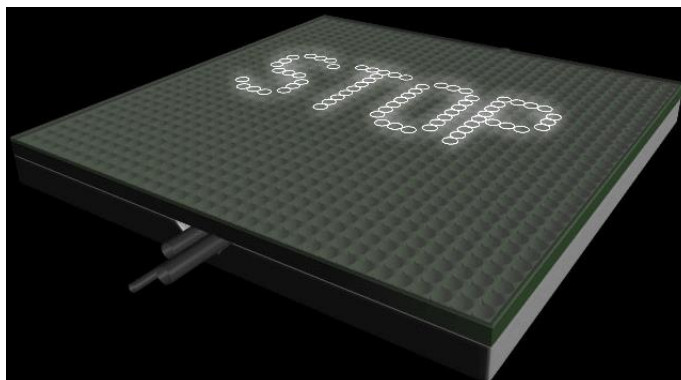


Figura 2.6 – Representação de um painel solar da *Solar Roadway* (Solar Roadways, 2014).

Ambiciona-se que as estradas solares tenham parques próprios para recarregar as baterias dos carros elétricos e que a geração de energia ao longo de quilómetro e meio de estrada seja o suficiente para abastecer 500 habitações.

Outros projetos, cujo objetivo é gerar energia elétrica a partir da energia solar, têm vindo a ser desenvolvidos em países como a Holanda, projeto *TNO – SolarRoad*, na Espanha e nos EUA pela empresa *Onyx Solar*. Contudo são sistemas incorporados numa ciclovia (Holanda), em passeios e vias pedonais (EUA) ficando um pouco fora do âmbito da presente dissertação.

2.2.2 Coletor solar asfáltico

A origem dos coletores solares asfálticos (CSA) veio do aproveitamento da energia solar absorvida pelos pavimentos rodoviários, especialmente quando se trata de pavimentos

betuminosos, que devido à sua cor escura proporciona uma maior absorção de energia solar. A tecnologia consiste na incorporação de tubos e bombas com arranjos específicos no pavimento, que permitem captar energia solar convertendo-a em energia térmica, além de permitirem também o seu armazenamento e transporte. Apesar de outras possíveis aplicações, este método é predominantemente adotado para o aquecimento e refrigeração dos pavimentos rodoviários.

Trata-se das técnicas de sistemas de geração de energia em pavimentos mais antiga, uma vez que as primeiras aplicações ocorreram no final dos anos 70, nos EUA, pelas mãos de Ion Wendel. Mais tarde, já na década de 90, o número de CSA aumentou em países como a Suíça, Alemanha e Japão. Em 1994, surge o SERSO (Figura 2.7), localizado na Suíça, com o objetivo de impedir a formação de gelo numa ponte rodoviária. Este sistema captura o calor absorvido pelo pavimento no verão através de um tubo de metal nele embutido e armazena-o em tubos perfurados na montanha a uma dada profundidade. Durante o inverno, a energia térmica anteriormente armazenada, é utilizada para manter a temperatura do pavimento da obra de arte acima do ponto de solidificação (Pascual *et al.*, 2008).

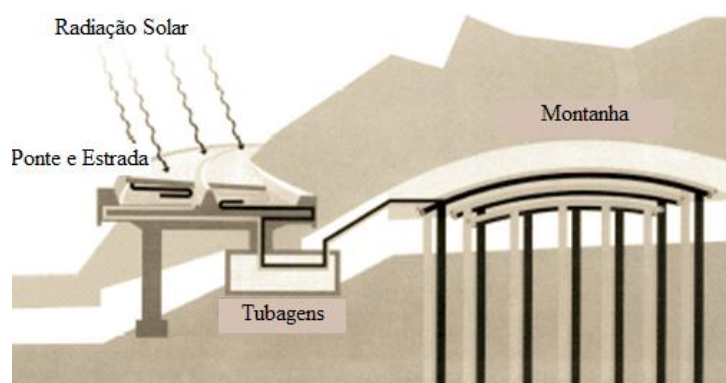


Figura 2.7 – Esquema do sistema SERSO na Suíça (Pascual *et al.*, 2008).

No ano seguinte, em 1995, foi instalado no Japão o sistema GAIA, um sistema equivalente ao SERSO. O sistema é composto por um transdutor térmico coaxial sob a forma de poços que acumula energia de forma inter-sazonal. A energia térmica armazenada no verão é libertada no inverno para derreter a neve.

Em 2001, Van Bijsterveld *et al.* (2001) realizam um estudo sobre a distribuição da temperatura ao longo do asfalto e do efeito dos tubos, nomeadamente quanto à sua durabilidade, profundidade e distâncias entre si. O estudo térmico e estrutural é realizado através de ensaios de campo, de laboratório e da criação de modelos numéricos, à semelhança do modelo efetuado por Wang *et al.* (2010) através do modelo de cálculo ANSYS para prever a resposta térmica do sistema.

Entre 1997 e 2001, é desenvolvido o sistema RES, cujo esquema pode ser observado através da Figura 2.8. Foi concebido sobretudo para aquecer e arrefecer os pavimentos rodoviários, aumentar a sua resistência ao fendilhamento e aquecer o interior de edifícios. O sistema consiste na colocação de uma série de tubos no asfalto, onde circula a água, e por dois aquíferos que servem para armazenar a água, estando estes 100 m afastados para evitar possíveis trocas de calor. Durante o verão, o frio armazenado é utilizado para arrefecer as estradas e os edifícios. No inverno, o calor armazenado pode ser utilizado para o arrefecimento do pavimento e dos edifícios.

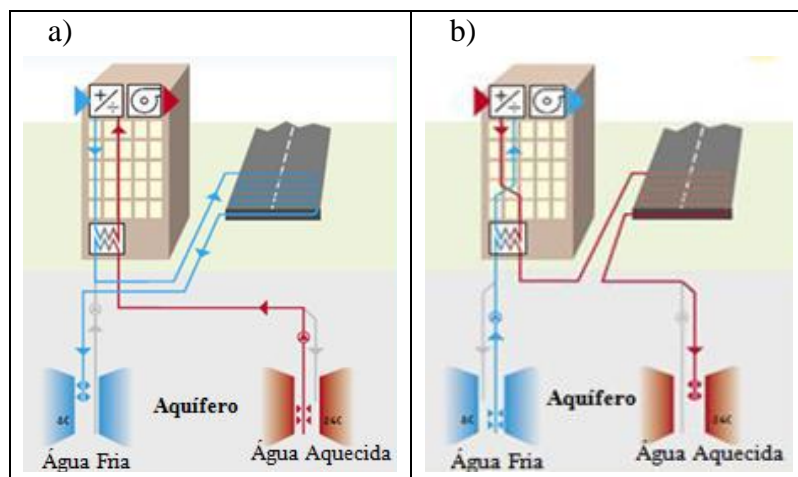


Figura 2.8 – Funcionamento do sistema RES: a) no inverno; b) no verão (Pascual *et al.*, 2008).

Outras empresas de vários países têm desenvolvido novos sistemas, nomeadamente o “Winnerway” em pavimentos rígidos e o “Zonneweg” em pavimentos constituídos por betão betuminoso drenante.

Outro sistema que permite o aquecimento de estradas é o *Pave Guard System* (PGS) desenvolvido por Corey McDonald, fundador da empresa Pave Guard Technologies, nos EUA, cuja aplicação é feita essencialmente em pontes rodoviárias. À semelhança dos sistemas anteriores, consiste no embutimento de tubagens sob as primeiras camadas do pavimento de modo a aquecer a superfície e a impedir a formação de gelo sobre a superfície de rolamento.

Quando a neve cai sobre o pavimento e lá fica depositada, a temperatura desce, pelo que são de imediato ativados uns sensores do sistema que ativam o funcionamento de uma bomba que força um líquido, a glicose, anteriormente aquecido pela radiação solar, a passar através de tubos embutidos no pavimento. Após esse acionamento, o gelo é derretido. O processo segue esquematizado na Figura 2.9 (PaveGuard, 2014).

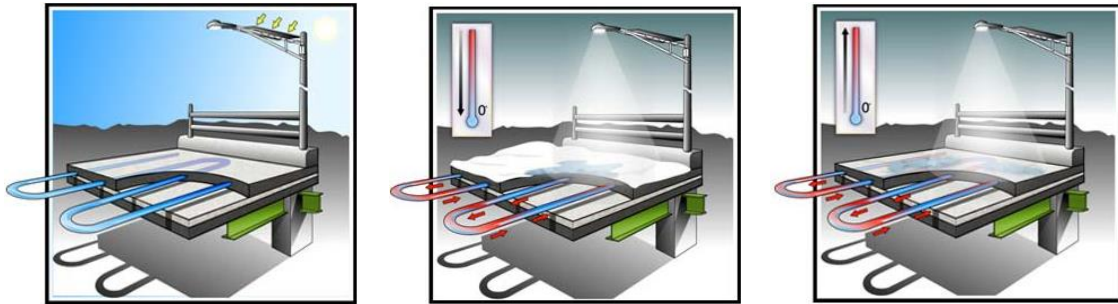


Figura 2.9 – Esquema de funcionamento do sistema *PGS* (PaveGuard, 2014).

2.2.3 Geradores termoelétricos

Os geradores termoelétricos, também conhecidos como TEG's, são dispositivos que através do gradiente térmico existente nos pavimentos, mais especificamente entre o leito do pavimento e a superfície deste, convertem a energia térmica em energia elétrica. Estes geradores (Figura 2.10) realizam essa tarefa usando matrizes de circuitos especializados, conhecidos como módulos termoelétricos, constituídos por materiais semicondutores, conhecidos como tipo *p* e tipo *n*, colocados entre substratos de cerâmica isolados.

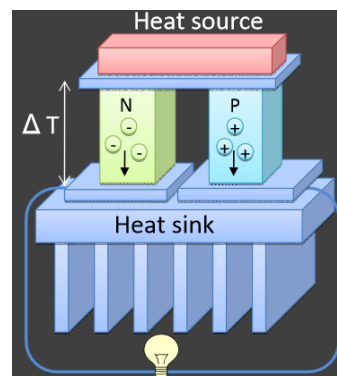


Figura 2.10 – Representação de um módulo termoelétrico.

Wu *et al.* (2011) estudaram a aplicação dos TEG's na superfície dos pavimentos e através de sucessivas simulações tentaram otimizar o seu *design*. Este estudo permitiu concluir que o aspecto primordial quanto à melhoria da eficiência do sistema está relacionado com a diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior do módulo termoelétrico. Quanto maior for essa diferença maior será a sua eficiência.

Os estudos revelaram uma eficiência reduzida, pelo que só instalando vários TEG's é que esta poderia ter relevância.

2.3 Considerações Finais

O conceito de geração de energia nos de pavimentos rodoviários está cada vez mais em voga, uma vez que a energia que daqui se obtém é limpa e renovável orientando a sociedade atual para um novo conceito de pavimentos sustentáveis.

Se por um lado existem já várias tecnologias desenvolvidas, certo é que apenas algumas foram já implementadas, e que apesar das suas potencialidades, nem todas conduzem à geração da mesma quantidade de energia, sendo que em alguns dos casos nem sempre é viável e apelativa a sua implementação, já que o investimento inicial associado aos mesmos poderá ser elevado.

A partir de um estudo realizado por Voigt *et al.* (2003), é possível comparar quatro técnicas, também, abordadas na presente revisão bibliográfica, através da Figura 2.11.

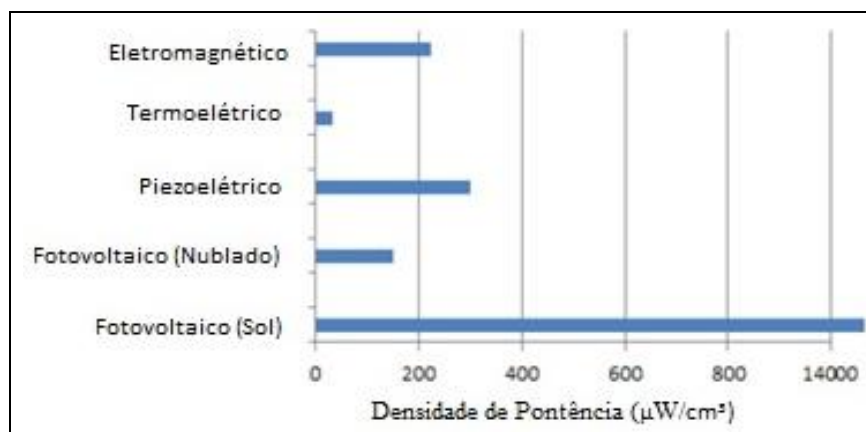


Figura 2.11 – Comparação da densidade de potência para quatro tipos de sistemas de geração de energia (Xiong *et al.*, 2012).

As conclusões que podem ser retiradas da figura anterior são óbvias. São os sistemas fotovoltaicos os detentores de um maior intervalo de energia elétrica gerada. Contudo, são extremamente dependentes de condições climáticas favoráveis, sendo que quando tal não acontece, dá-se um decréscimo abrupto da quantidade de energia gerada (sistema fotovoltaico em condições nubladas). Verifica-se também, que os sistemas eletromagnético e piezoelétrico apresentam valores de densidade de potência bastante similares.

No Quadro 2.1 faz-se a comparação das principais vantagens e desvantagens de cada sistema descrito anteriormente.

Quadro 2. 1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de geração de energia.

| Sistema | Vantagens | Desvantagens |
|-----------------------------|--|---|
| Piezoelétrico | <ul style="list-style-type: none"> -Independente de fatores ambientais específicos; -Livre de manutenção adicional após implementação; -Aproveitamento da energia mecânica desperdiçada; -À prova de roubos e danos. | <ul style="list-style-type: none"> -Baixa produção e energia; -Necessidade de elevado número de sensores para produzir energia apreciável; -Dependente do tráfego automóvel e pedonal e respetivos pesos; -Possibilidade de desvios dos condutores não contribuindo para a geração de energia; -Manutenção complexa. |
| Eletromecânico e Hidráulico | <ul style="list-style-type: none"> -Independente de fatores ambientais específicos; -Aproveitamento da energia mecânica desperdiçada; -Podem funcionar como medidas de acalmia de tráfego; -Produção de energia considerável; -Baixo custo de manutenção. | <ul style="list-style-type: none"> -Necessita cargas para acionar o sistema; -Quantidade de energia depende da massa do veículo/peão; -Limitação dos locais de implementação; -Instalação mais complexa que o piezoelétrico. |
| Fotovoltaico | <ul style="list-style-type: none"> -Aproveitamento da energia solar; -Possibilidade de incorporação de LED's substituindo a marcação rodoviária; -Possibilidade de recarregar baterias dos carros elétricos; -Produção de elevadas quantidades de energia; -Aplicação em grande escala. | <ul style="list-style-type: none"> -Dependente de fatores ambientais específicos; -Possíveis problemas de aderência e capacidade de cargas; -Frequência de manutenção elevada e respetivos custos; -Durante o movimento dos veículos não existe incidência da radiação solar; |
| Coletor Solar Asfáltico | <ul style="list-style-type: none"> -Aproveitamento da energia solar; -Poupança de energia no aquecimento/arrefecimento de edifícios; -Segurança rodoviária; -Minimização do efeito gelo/degelo e consequente aumento da vida útil do pavimento; -Vasto número de sistemas efetivamente implantados; | <ul style="list-style-type: none"> -Dependente de fatores ambientais específicos; -Não produz energia elétrica; -Difícil instalação do sistema e respetivos custos são elevados. |

3 MATERIAIS E DISPOSITIVOS UTILIZADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

3.1 Materiais Utilizados em Pavimentos Rodoviários

A necessidade de transportar bens e serviços por via terrestre conduziu à criação de um conjunto de redes de caminhos e estradas. Foi no Egito com a construção das pirâmides, a 2600-2400 a.C. que foi construída a estrada mais antiga do mundo, destinada à circulação de trenós que auxiliavam no transporte de cargas.

O conceito de estrada, incluindo o planeamento e a construção surge bem mais tarde, pelos Romanos e à medida que a civilização avança, principalmente após a invenção do automóvel (século XVII), surgindo inevitavelmente maiores preocupações na procura de vias de comunicação que maximizem o conforto e segurança dos utentes. Desde então, o pavimento rodoviário tem vindo a sofrer uma evolução notável no que respeita às características, tanto funcionais como estruturais, estando a primeira relacionada com o conforto e segurança na circulação e a segunda com a capacidade de carga do pavimento. O pavimento rodoviário pode ser definido como sendo uma estrutura constituída por várias camadas que se apoiam na fundação composta pelo terreno natural, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços provenientes da ação do tráfego e do clima, pois são estes que condicionam o seu comportamento (Branco *et al.*, 2011).

Tendo em conta as funções que as camadas de um pavimento desempenham, podem-se estabelecer dois grupos importantes: a camada superficial (camada de desgaste) e o corpo do pavimento, sendo que é a camada de desgaste que assegura a qualidade funcional e colabora também do ponto de vista da qualidade estrutural uma vez que contribui para a durabilidade do pavimento, através da impermeabilização deste. Por sua vez, o corpo do pavimento assegura a capacidade de suporte das cargas a que pode vir a ser submetido, sendo composto por camadas estabilizadas com ligantes (betuminosos ou hidráulicos) e camadas granulares. Na Figura 3.1, esquematiza-se uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário, no caso do corpo do pavimento ser composto por camadas betuminosas.

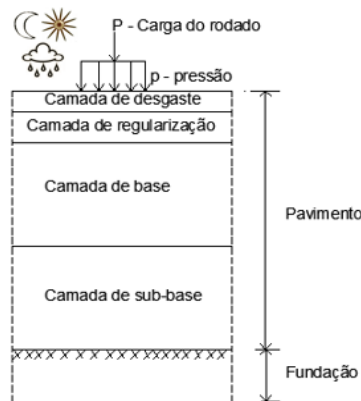


Figura 3.1 – Constituição de uma estrutura tipo de um pavimento rodoviário e ações atuantes.

Em função dos materiais utilizados e da sua deformabilidade, resultam diferentes tipos de pavimentos, a que correspondem diferentes comportamentos, quando solicitados pelas ações mencionadas: tráfego e clima. Assim, os pavimentos podem ser de três tipos: flexível; rígido; e semirrígido.

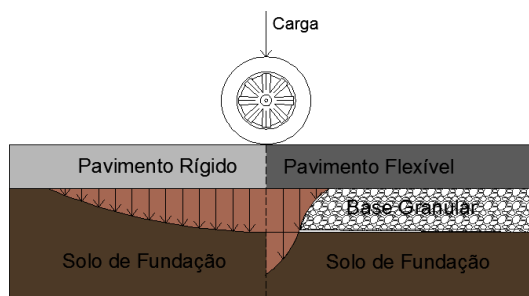


Figura 3.2 – Configuração aproximada da distribuição de tensões verticais.

Pretende-se estudar as características das várias misturas betuminosas passíveis de serem aplicadas em camadas de desgaste de um pavimento rodoviário, visto que é esta a camada que está em contacto com o pneu e que deve garantir coeficientes de atrito e níveis de ruído de acordo com os limites exigidos e uma textura adequada para permitir o escoamento das águas (Branco *et al.*, 2011).

3.1.1 Misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste

As misturas betuminosas são constituídas vulgarmente por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados numa central com determinada quantidade de ligante. Às misturas betuminosas e aos seus materiais constituintes são exigidas determinadas características gerais, quer durante a sua construção quer após a sua entrada em serviço. De uma forma geral, são exigidas às misturas betuminosas características como

estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco *et al.*,2011).

Quando aplicadas em camadas de desgaste, as misturas betuminosas devem ter características funcionais como boas condições ao nível da segurança e do conforto garantindo os critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. São estas exigências que têm levado ao desenvolvimento de misturas betuminosas especiais para as camadas de desgaste, tais como as misturas drenantes ou as misturas rugosas, de elevada textura e excelente comportamento em vias rápidas e na presença de água.

Em Portugal, as misturas betuminosas destinadas à realização de camadas de desgaste são fabricadas a quente. Essas misturas são o betão betuminoso, o betão betuminoso drenante, o betão betuminoso rugoso e o micro betão betuminoso rugoso (EP, 2009).

Os agregados são as partículas que constituem o esqueleto mineral das misturas betuminosas. Estes devem ser resistentes à fragmentação e ao desgaste eventualmente produzido pelo tráfego e quando empregues em camadas de desgaste os agregados devem ter elevada resistência ao polimento. A Norma Europeia que define os requisitos aplicáveis a agregados para misturas betuminosas é a NP EN 13043. Como fíler deve ser utilizado o fíler comercial e/ou fíler recuperado, proveniente do processo de fabrico da mistura betuminosa e deve cumprir os requisitos especificados na norma anteriormente referida.

A ligação entre os agregados, isto é, a coesão e a estabilidade da mistura é feita através do ligante betuminoso. Este ligante possui qualidades e características que o diferenciam significativamente dos restantes agentes coesivos por proporcionarem ligações resistentes e flexíveis aos materiais com eles tratados. Existem vários tipos de ligantes que podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas, como o betume asfáltico, betume fluidificado, emulsões betuminosas e betume asfáltico modificado, sendo que o mais utilizado em trabalhos de pavimentação rodoviária é o betume asfáltico.

Dependendo o comportamento do betume da temperatura, é necessário que os ligantes a integrar na mistura, apresentem uma gama de temperaturas compatíveis com as que irão estar sujeitos quando aplicado no pavimento. Em Portugal, nas misturas betuminosas a quente aplicadas em camadas de desgaste, utilizam-se predominantemente betumes de classe de penetração 35/50 e 50/70 e devem obedecer aos requisitos indicados na Norma Europeia EN 12591, onde são especificadas as propriedades e métodos de ensaio adequados para a caracterização deste tipo de betumes (CEPSA, 2006).

Em condições em que se pretende reduzir a suscetibilidade térmica dos betumes, aumentar a sua flexibilidade e melhorar características como a drenabilidade superficial e ruído causado pelo rolamento são utilizados betumes modificados, cujas propriedades reológicas são

modificadas durante o fabrico pela adição de um ou mais agentes químicos como os elastómeros, plastómeros, enxofre, borrachas, fibras orgânicas ou inorgânicas, resinas e endurecedores. Este tipo de betume tem vindo a ser muito utilizados em camadas superficiais, com o objetivo de melhorar a segurança e o conforto dos utentes. Dos betumes modificados, o mais utilizado quando aplicado em camadas de desgaste é o que é conseguido através da adição de elastómero, destinado ao fabrico de betão betuminoso drenante e microbetuminoso rugoso (Branco *et al.*, 2011).

Após uma breve descrição dos materiais constituintes das misturas betuminosas, ir-se-ão descrever as principais características das misturas betuminosas fabricadas a quente destinadas à realização das camadas de desgaste.

3.1.1.1 Betão betuminoso (BB)

É uma mistura resistente à ação abrasiva do tráfego mas pouco permeável, cuja macrotextura pode ser relativamente baixa, não sendo a mistura mais adequada para aplicar em vias com velocidades de circulação elevadas e com climas chuvosos. A dita mistura é aplicada com espessuras entre 4 e 6 cm.

3.1.1.2 Betão betuminoso drenante (BBD)

O BBD é uma mistura que tem características especiais para melhorar a segurança e comodidade da circulação, devido à sua elevada porosidade, reduzindo os problemas de hidroplanagem e de ruído. A drenagem da água é feita do interior da camada até às bermas e não à superfície como é habitual.

As misturas drenantes não devem ser aplicadas em pavimentos situados em zonas com elevada probabilidade de ocorrência de neve ou formação de gelo, mas podem e devem ser aplicadas em zonas que tenham climas chuvosos, ou pelo menos em zonas em que chove regularmente, para que seja garantida a limpeza da camada superficial (CEPSA, 2006). A mistura é geralmente aplicada numa espessura constante de 4 cm.

3.1.1.3 Betão betuminoso rugoso (BBR) e micro betão betuminoso rugoso (MBBR)

Os betões betuminosos rugosos proporcionam camadas de desgaste com uma excelente macrotextura que influencia positivamente a segurança de circulação, especialmente perante a ocorrência de chuva e quando o pavimento se encontra molhado e à semelhança do BBD também reduz o ruído. Estas misturas são geralmente aplicadas em estradas e autoestradas destinadas a tráfegos relativamente elevados e são aplicadas com espessuras que variam entre os 3,5 e 5 cm no caso do BBR e 2,5 e 3,5 cm quando se trata de MBBR.

3.1.2 Revestimento antiderrapante

Face à pressão constante no aumento da segurança rodoviária bem como do conforto dos utentes, surgiu a necessidade da utilização de sistemas de elevado coeficiente de atrito que, reduzindo as distâncias de travagem, reduzem conseqüentemente a sinistralidade rodoviária.

Neste sentido surgem os revestimentos antiderrapantes, em alternativa aos materiais habitualmente utilizados na camada de desgaste, sendo caracterizados por excelentes propriedades superficiais como a textura, o atrito e a capacidade de drenar a água evitando o fenómeno da aquaplanagem.

A mistura é conseguida através de uma resina adesiva e inertes seleccionados. Quanto ao processo construtivo, os materiais podem ser aplicados a quente ou a frio, manualmente (Figura 3.3) ou mecanicamente (apenas quando se trata de grandes áreas).



Figura 3.3 – Aplicação manual a frio de um revestimento antiderrapante (Neoasfalto, 2014).

A aplicação a quente utiliza como ligante uma resina termoplástica e agregados seleccionados. A aplicação a frio utiliza como ligante uma resina epóxica ou de poliuretano a dois componentes, sendo o componente A uma mistura homogénea de ligante e materiais finos e o componente B um endurecedor aplicado imediatamente antes do agregado. A escolha do agregado depende do tipo de tráfego previsto para a área em questão, pelo que em percursos rodoviários devem ser utilizadas gravilhas com origem em rocha dura: granito, basalto ou areia de sílica. Ambos os sistemas podem ser aplicados sobre betuminoso, betão e metal. Para maximizar a aderência entre o revestimento e a base, o local de aplicação deve ser bem limpo (Neoasfalto, 2014).

Além das propriedades já mencionadas, estes revestimentos têm a particularidade de exibir diferentes colorações que por si só permitem clarificar diferentes funções dos espaços, pelo que são aplicados em aproximações a passagens de peões, vias de inclinação acentuada,

aproximação a rotundas e cruzamentos, curvas perigosas, entre outras. Porém, a sua utilização restringe-se a zonas particularmente perigosas do ponto de vista da aderência dado o seu elevado custo, que embora não sendo dos materiais mais dispendiosos, é-o comparado com as misturas ditas tradicionais.

3.1.3 Granalhagem

A granalhagem é uma técnica relativamente recente em Portugal, tendo aparecido em 2006, e consiste na projeção de um abrasivo metálico, vulgarmente conhecido como granalha, na camada superficial do pavimento. Esta técnica permite aumentar o valor do coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento aumentando assim as condições de aderência. Potência também a limpeza da superfície do pavimento, já que ao longo do tempo são associadas ao pavimento partículas contaminantes como as partículas de borracha dos pneus, lamas e materiais soltos, que estimulam o desgaste deste e, conseqüentemente, uma menor aderência entre o pneu e o pavimento assim como a sua impermeabilidade (Ferreira, 2007).

O processo é conseguido através de máquinas granalhadoras que projetam a granalha no pavimento a elevadas velocidades, cuja granalha é principalmente do tipo esférica, criando uma forte abrasão superficial (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Pavimento antes e após a granalhagem e respetiva máquina granalhadora (Luso Granalhagem, 2014).

Esta técnica beneficia todos os utilizadores, uma vez que os níveis de segurança rodoviária são aumentados, diminuindo a sinistralidade rodoviária. Além disso é uma técnica pouco dispendiosa e no momento da sua aplicação não remove ou danifica a sinalização horizontal.

3.1.4 Marcas Rodoviárias

Nesta subsecção é dado destaque às marcas rodoviárias, na qual se pretende fazer uma análise à regulamentação nacional e aos requisitos exigidos à marcação rodoviária no que respeita aos materiais utilizados e às características que lhes são exigidas.

As marcas rodoviárias destinam-se a regular a circulação e a advertir e orientar os utentes das vias públicas, podendo ser complementadas com outros meios de sinalização. Segundo a Convenção de Viena (ONU, 1995) as marcas rodoviárias devem definir as zonas do pavimento destinadas aos diferentes sentidos de circulação e indicar, em determinados casos, os comportamentos que os utentes devem seguir. Por desempenharem várias funções distintas, as marcas rodoviárias podem ser classificadas como: marcas longitudinais, marcas transversais, marcas reguladoras do estacionamento e paragem, marcas orientadoras de sentidos de tráfego, marcas diversas e guias e dispositivos retrorrefletores complementares.

A regulamentação nacional existente compreende os seguintes documentos: Código da Estrada, Regulamento de Sinalização do Trânsito (RST) e a Norma de Marcas Rodoviárias (NMR) da antiga Junta Autónoma de Estradas (JAE). Sobre esta matéria existe ainda um conjunto de textos da autoria do Engenheiro Carlos Roque, que servem também de apoio técnico. O conjunto de documentos indicados pretende uniformizar as características, regras de utilização e de aplicação das marcas rodoviárias.

As marcas rodoviárias devem garantir um comportamento adequado, permitindo conjugar não só a qualidade de emissão da informação que estas pretendem transmitir, como a qualidade de receção por parte do condutor, assegurando igualmente uma condução cómoda e segura. Para tal, é necessário ter em conta os seguintes critérios: cor, visibilidade, durabilidade e aderência.

3.1.4.1 Cor

Consoante se trate de sinalização temporária ou permanente, as marcas rodoviárias podem ter cor amarela ou branca, respetivamente, sendo que a sinalização permanente é sempre branca, à exceção das marcas reguladoras de estacionamento e paragem que têm cor amarela.

3.1.4.2 Visibilidade

“O ser humano é, antes de tudo, uma criatura que se rege pela visão”. Poder-se-á afirmar que a visibilidade de uma marca rodoviária constitui uma característica de máxima importância, uma vez que permite fornecer, visualmente, ao condutor as informações necessárias ao seu comportamento.

Em condições de iluminação difusa, isto é, em condições em que a iluminação emerge da luz solar ou de postes de iluminação pública, a visibilidade da marca é tanto maior quanto maior for o contraste entre a marca e o pavimento sobre o qual está aplicada, principalmente se se tratar de pavimentos betuminosos (cores escuras). Em pavimentos de betão de cimento (pavimentos claros) é aconselhada a aplicação prévia de um produto de forma que a largura da marca seja excedida e para que sejam melhoradas as condições de adesividade do material (JAE, 1995). Em condições em que a única iluminação existente é a proveniente dos faróis de um veículo, em períodos noturnos ou ainda perante períodos intensos de chuva, é necessário que a marca continue a cumprir a sua função, e para tal é fundamental que tenha capacidade retrorrefletora, característica que é conseguida através da incorporação de microesferas de vidro na própria marca.

3.1.4.3 Durabilidade e desgaste

O desgaste mecânico das marcas rodoviárias é uma das principais causas da sua degradação e desaparecimento, o que permite concluir que a durabilidade de uma marca está diretamente relacionada com o volume de tráfego e da sua composição (veículos ligeiros ou pesados).

Outros fatores que conduzem igualmente à diminuição da sua durabilidade, é a presença de areias ou materiais soltos no pavimento assim como a utilização de correntes nos pneus. O pavimento sobre o qual a marca está aplicada também é determinante, tanto quanto ao tipo de pavimento, tanto quanto ao seu estado de conservação. As Normas de Marcas Rodoviárias da JAE (1995) indicam que o produto utilizado na marcação rodoviária pode igualmente condicionar a sua durabilidade definindo, ainda que num contexto não rigoroso, o tipo de material que deve ser aplicado em função quer do tráfego quer da largura da faixa de rodagem

3.1.4.4 Aderência

A aderência representa o efeito que a marca pode ter quanto ao coeficiente de atrito na superfície. Garantindo coeficientes de atrito adequados, é aumentada a resistência à derrapagem. A resistência à derrapagem é uma propriedade da superfície da marca rodoviária que garante a aderência do veículo ao pavimento, isto é, limita o movimento relativo entre o pneu do veículo e a superfície da marca. O coeficiente de atrito é medido de acordo com a norma europeia EN 13036-4, a qual preconiza o teste do pêndulo britânico, que consiste em medir a perda de energia quando um elemento de borracha desliza sobre a superfície da marca rodoviária a testar.

A aderência da marca pode ser melhorada através da incorporação de agregados antiderrapantes, conjugando cuidadosamente a dosagem destes agregados com as microesferas de vidro. Os requisitos a serem tidos em conta, quer na utilização de agregados antiderrapantes

quer na de microesferas, bem como na sua mistura, são preconizados na norma NP EN 1423:2008.

As normas aplicáveis no âmbito da marcação rodoviária são: NP EN 1423:2008, NP EN 1424:2008, EN 1436:2007, NP EN 1790:2006, NP EN 1824:2008, NP EN 1871:2008, NP EN 12802:2008, NP EN 13197:2005.

Face ao crescimento acentuado do número de veículos que circulam nas vias de comunicação, tem surgido cada vez mais a necessidade de procurar soluções tecnológicas inovadoras que garantam não só níveis de segurança adequados, como a aderência e durabilidade, mas também que o tempo de secagem, quando se trate de pinturas, seja cada vez mais curto, para que os trabalhos de sinalização sejam executados no menor espaço de tempo. No Decreto Regulamentar N°22-A/98 (RST, 1998) constam quais os tipos de materiais que podem ser utilizados na marcação rodoviária como sejam: pinturas, lancis, fiadas de calçada, elementos metálicos ou de outro material, fixados no pavimento.

Contudo, a materialização das marcas é feita principalmente por pintura, que se baseia em dois tipos: a pintura a frio e a pintura a quente. A pintura a frio é feita com tintas acrílicas de um ou de dois componentes, já a pintura a quente é feita com tintas termoplásticas ou material termoplástico prefabricado. Segue no Anexo A um quadro no qual foram reunidas as características dos tipos de tintas referidas, cujos valores são fornecidos nas várias fichas técnicas consultadas.

Quaisquer destes produtos, desde que fabricados em condições normais e exigidas pelas normas de execução, são compostos por diversos materiais, dos quais se destacam: ligantes, pigmentos, cargas minerais, diluente e aditivos. Dos constituintes referidos são os pigmentos e os aditivos que conferem ao material as qualidades que no final dão um bom desempenho ao produto acabado.

Distinguem-se das restantes marcas rodoviárias, os pré-avisos (pertencentes às marcas diversas e guias), com as quais se pretende alertar os condutores da necessidade de praticar velocidades mais baixas, sendo tratadas como “casos especiais” na NMR da JAE (1995). São caracterizadas por uma sequência de linhas transversais contínuas espaçadas entre si e podem ser de dois tipos: bandas sonoras (espessura de tinta com cerca de 7 mm) e bandas cromáticas (espessuras mais elevadas que podem atingir os 30 mm). Recentemente, as bandas sonoras, têm vindo a ser implementadas também longitudinalmente, como guias delimitadoras da faixa de rodagem, onde se pretende alertar os condutores do seu desvio na faixa de rodagem.

Como complemento às marcas rodoviárias, podem também ser utilizados marcadores. São dispositivos aplicados sobre o pavimento da via para reforçar a visibilidade das marcas principalmente durante a noite ou em condições de visibilidade reduzida, tornando a operação

na via mais eficiente e segura. Estes podem ser uni ou bidirecionais em função de possuírem uma ou duas unidades refletoras e a sua altura não deve exceder os 2,5 cm acima do nível do pavimento, mas podem ter dimensões variáveis (NP EN 1463, 2009). Quanto à cor, aplica-se exatamente o mesmo princípio das restantes marcas à exceção de quando são utilizadas em vias de acesso a portagem, caso em que devem ser de cor verde.

Os marcadores devem ser constituídos por um material policarbonato, ou outro material que tenha elevada capacidade de resistência à compressão, capaz de suportar grandes impactos e resistente às intempéries. O corpo destes dispositivos é vulgarmente constituído por resina sintética à base de poliéster ou plástico acrílico, ou qualquer outro material plástico, desde que apresente alta resistência à compressão. Devem ser simplesmente colados sobre o pavimento.

3.2 Dispositivos Utilizados em Pavimentos Rodoviários

3.2.1 Lombas redutoras de velocidade

Perante as crescentes necessidades de mobilidade, o planeamento das acessibilidades e transportes atribuiu durante muito tempo prioridade ao transporte individual motorizado. Essa prioridade, marcada pela construção de vias públicas destinadas essencialmente a escoar grandes volumes de tráfego e a maximizar o conforto dos ocupantes, originou efeitos indesejáveis ao nível social, ambiental e também económico.

De forma a mitigar os referidos efeitos, surge o conceito de acalmia de tráfego, que tem como objetivo a compatibilização das condições de circulação entre os diferentes modos de deslocação e transporte, promovendo o respeito pela presença dos utilizadores mais vulneráveis e aumentando a sua segurança real e induzida (INIR, 2011). A sua aplicação caracteriza-se pela introdução de alterações físicas à geometria das vias, relativamente aos alinhamentos horizontais e verticais, de forma a reduzir a velocidade praticada pelos veículos motorizados e em alguns casos controlar/reduzir os volumes de tráfego.

As lombas redutoras de velocidade (LRV) consistem na alteração de cota da superfície do pavimento da via com o objetivo de produzir um impacto visual e físico no condutor e, dessa forma, induzir à redução da velocidade de circulação (DGV, 2004). Apesar das desvantagens da sua aplicação, as LRV são a medida de acalmia de tráfego mais utilizada em todo o mundo porque permitem não só a redução da velocidade dos veículos, mas também a redução dos volumes de tráfego, quando tal for pertinente. Além disso são soluções económicas.

As lombas são essencialmente de dois tipos, em função do seu comprimento e da sua altura. As primeiras a surgir pertencem ao grupo das lombas curtas e altas, designadas nas fontes anglo-

saxónicas de *speed bumps*, caracterizadas por comprimentos até 1 m e altura de cerca de 10 cm (Figura 3.5 a). A aplicação deste tipo de lombas tem sido desaconselhada devido aos inconvenientes causados, sobretudo, nos danos causados nos veículos e no aumento da poluição sonora. Surgem posteriormente as *speed humps* (Figura 3.5 b), que são lombas mais alongadas como são as circulares, sinusoidais, parabólicas e trapezoidais.

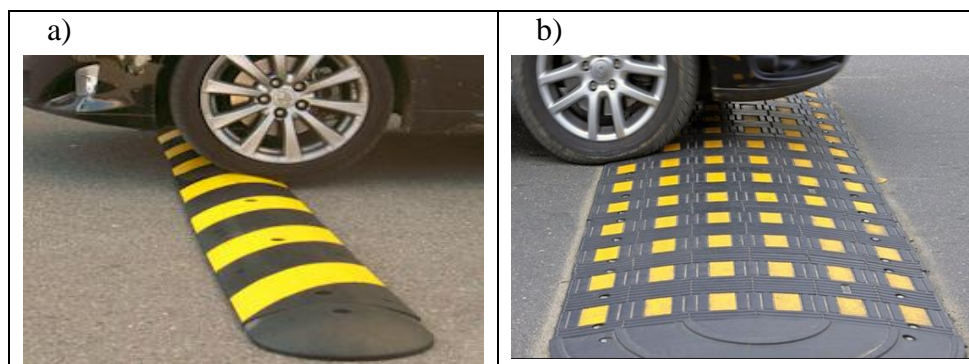


Figura 3.5 – Diferentes tipologias de lombas tradicionais: a) *Speed bump*; b) *Speed hump*.

Por existirem outro tipo de utilizadores da via pública, como por exemplo ciclistas e veículos longos, sendo suscetíveis a maiores desconfortos causados por estes dispositivos, surgem tipologias alternativas às referidas anteriormente. Exemplos dessas alternativas são as lombas do tipo “almofada” (*speed cushion*) (Figura 3.6 a) caracterizadas pela sua forma quadrilátera possibilitando a transposição da zona da lomba sem sofrer os efeitos indesejáveis. São também exemplo as lombas combinadas (Figura 3.6 b) caracterizadas por diferentes inclinações de rampas consoante os diferentes tipos de utilizadores: perfil mais suave destinado aos veículos de grande dimensão e outro mais agressivo para os veículos ligeiros.

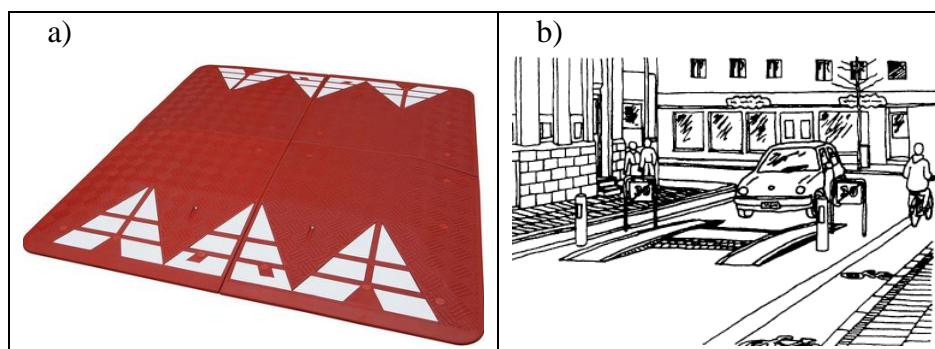


Figura 3.6 – Tipologias alternativas de lombas: a) Lomba do tipo almofada, *speed cushion*; b) Lomba do tipo combinado (Steen e Hageback, 1999).

Em países como a Holanda são já aplicados dispositivos tipo lomba cuja tipologia difere bastante do que é habitual em Portugal, mas que têm igualmente capacidade de reduzir a velocidade de circulação automóvel detendo um design inovador e esteticamente agradável

(Figura 3.7). Uma vez que este tipo de lombas não está contemplado na legislação em vigor em Portugal, não existe glossário técnico.

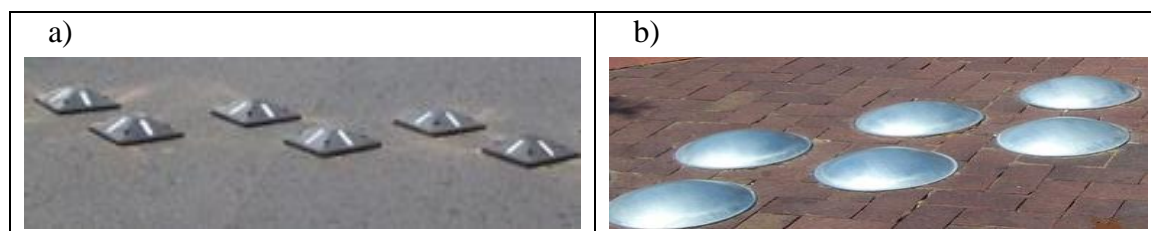


Figura 3.7 – Tipologia alternativa de lombas: a) Forma quadrilátera; b) Forma semiesférica (<http://www.saspeedbumps.co.za>).

No que respeita ao enquadramento legal do tema, não existe uma uniformização internacional relativamente aos aspetos geométricos das lombas, nomeadamente quanto à sua forma, altura e comprimento, quanto aos domínios de aplicabilidade nem relativamente aos materiais pelos quais os dispositivos são constituídos.

A nível nacional, é a nota técnica da DGV (DGV, 2004) que estabelece um conjunto de critérios e regras a seguir no projeto, instalação e manutenção das LRV. Nesta nota técnica são apresentadas as regras de dimensionamento das seguintes tipologias de lombas: as sinusoidais, as circulares e as trapezoidais, cujas formas são ilustrados na Figura 3.8.

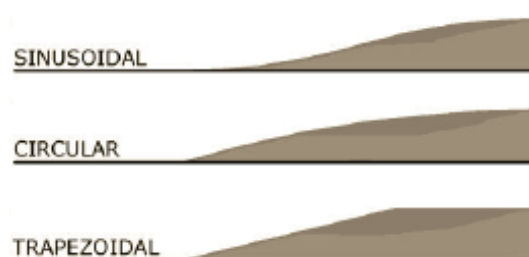


Figura 3.8 – Forma das lombas contempladas na nota técnica da DGV (INIR, 2011).

3.2.1.1 Domínio de Aplicabilidade

O fato de existirem várias formas de lombas admissíveis e vários níveis de retração física, potencia um campo de aplicação muito vasto. Os principais fatores condicionantes à sua aplicação são a hierarquia da via, as condições locais, o tráfego de atravessamento da via e os utilizadores considerados prioritários.

As lombas podem ser aplicadas de forma isolada ou em grupo, dependendo o espaçamento entre si da velocidade praticada na via em causa. As recomendações da DGV (2004) apontam para valores gerais de espaçamentos compreendidos entre 40 a 150 m não sendo, contudo,

apresentada nenhuma relação entre o espaçamento e a velocidade de circulação, como acontece noutros países.

Os locais mais apropriados para a aplicação de lombas são as vias de acesso local em zonas residenciais e comerciais sendo que em vias distribuidoras locais a recomendação é mais cautelosa (Quadro 3.1). O uso de LRV não é aconselhável em vias distribuidoras principais, excetuando os casos muito particulares de vias deste tipo que se situem em centros urbanos de malha antiga, onde existam problemas graves de segurança nomeadamente para os peões (Seco *et al.*, 2008).

Quadro 3.1 – Resumo do domínio de aplicabilidade das lombas redutoras de velocidade.

| LRV | Domínio de aplicabilidade | | |
|-----|---------------------------|--|---|
| | Velocidade limite | Volumes de tráfego | Tipo de vias |
| | Até 40 a 50 km/h | Até TMD_A entre 3000 a 5000 veículos | Essencialmente vias de acesso local em zonas residenciais e comerciais. Não recomendadas para trajetos com intenso tráfego de pesados e veículos de emergência. |

3.2.1.2 Materiais

Quanto aos materiais pelos quais as LRV são constituídas, embora existam no mercado diversos tipos, importa optar por materiais que confirmam níveis de atrito adequados quer para a circulação de veículos quer para a circulação de peões. Os materiais mais recorrentes são: calçada, asfalto, borracha ou material plástico, metal e betão, sendo os últimos muito pouco utilizados.

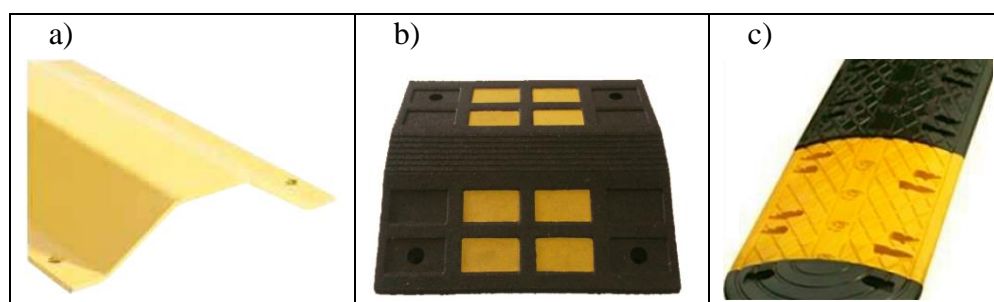


Figura 3.9 – Exemplos de materiais utilizados em lombas: a) lomba em metal (Manutan, 2014); b) lomba em borracha de pneu reciclada (Ecoprodev, 2014); c) lomba em PVC (Sintimex, 2014).

As lombas de borracha de pneu reciclada (Figura 3.9 b) distinguem-se pela sua alta resistência e insonorização, uma vez que não geram ruído à passagem dos veículos, constituindo uma excelente opção quando for importante minimizar a poluição sonora causada por estes

dispositivos. Porém, as LRV vulgarmente utilizadas são as lombas em asfalto e elementos modulares em borracha natural vulcanizada, com incrustações retrorrefletoras em laminado elastoplástico de cor amarela para que o condutor possa identificar a sua localização. Apesar da existência de outros modelos, no caso da 3M são comercializados principalmente os seguintes modelos: dorso de 3, 5 e de 7 cm, para estradas com limite de velocidade inferior a 50, 40 e 30 km/h, respetivamente.

Do estudo às várias fichas técnicas consultadas, foi possível reunir algumas informações quanto às características físicas e mecânicas das lombas em borracha mais utilizadas em Portugal. Esse quadro pode ser consultado no Anexo A.

3.2.2 Juntas de Dilatação em Obras de Arte

As juntas de dilatação são um componente cuja importância não pode ser menosprezada por se tratar de dispositivos recorrentemente utilizados em Obras de Arte. Nesse sentido é importante estudar quais os materiais que as constituem, pois estes podem ter propriedades interessantes ao estudo que se pretende realizar, isto é, na procura de materiais para servir de revestimento aos módulos do sistema em estudo.



Figura 3.10 – Exemplo de junta de dilatação (Lima e Brito, 2009).

Uma junta de dilatação pode ser definida como sendo uma separação entre duas partes de uma estrutura, permitindo que ambos os elementos possam movimentar-se, movimentos esses que são provocados por dilatações e retrações dos materiais, sem que haja transmissão de esforço entre eles. As juntas de dilatação diferenciam-se pela amplitude do movimento. O tratamento que recebem quanto ao seu fecho tem que ter em conta essa amplitude de movimento.

Relativamente ao enquadramento legal do tema, as juntas de dilatação a aplicar em obras de arte, têm que apresentar marcação CE e deve ser obrigatoriamente aplicado o estabelecido na norma europeia ISO 9001:2000 EN 1337, com especial destaque para a parte 3, sempre que a junta for constituída por elastómeros.

Fruto dos diferentes critérios de abordagem no âmbito das juntas, é expectável que as suas classificações difiram consoante a bibliografia consultada, como é o exemplo da Norma BD 33/94 (The Highways Agency, 1994) e do *Bridge Design Manual* (Washington State Department of Transportation, 2014). Não sendo do âmbito da presente dissertação caracterizar cada tipo de junta, ir-se-á apenas indicar os materiais pelos quais são constituídas.

As juntas de dilatação são principalmente constituídas por dois materiais: aço e elastómero. Podem ainda ser constituídas por perfis de PVC de alta densidade concebidos sobretudo para apresentar excelentes características de flexibilidade e durabilidade. Sendo que as juntas de maior utilização são as que têm na sua constituição o aço e elastómeros, são estes os materiais cujas características serão pormenorizadas de seguida.

3.2.1.1 Aço

Normalmente, os perfis metálicos, vigas transversais e elementos instalados nos bordos da junta, são em aço carbono protegido por um revestimento, ou em aço com resistência à corrosão. Em partes móveis, como os pernos colocados em juntas de elastómero com chapas metálicas, ligados com PTFE (comercialmente designado de teflon), são em aço inoxidável. Em zonas de difícil acesso, como no caso dos elementos de ligação, também se usa aço inoxidável ou aço com resistência à corrosão. Quando envolto em betão, o aço inoxidável não necessita de qualquer proteção contra a corrosão. Contudo, o mesmo já não se aplica quando se trate de aço carbono (Ramberger, 2002).

Quanto ao revestimento, Remberger (2002) refere que deve ser de alta resistência de forma a que seja possível suportar os esforços mecânicos, as ações de temperatura e o sal de degelo e deve ser escolhido de acordo com as normas nacionais estabelecidas. Contudo, é recomendado que o revestimento base seja constituído por epóxi bi-componente de pó de zinco e uma última camada composta por epóxi bi-componente de ferro micáceo.

Ao ser aplicado um revestimento elastomérico para proteger o aço contra a corrosão, o material deve satisfazer os requisitos de resistência e durabilidade necessários. Se a proteção for por galvanização, o habitual é que seja feita a quente. Pode ser também através de spray galvanizante, embora seja um processo mais dispendioso (Ramberger, 2002).

3.2.1.2 Elastómero

O elastómero, a aplicar nas juntas de dilatação, deve ser resistente às variações ambientais, ao sal de degelo e às águas alcalinas e ácidas.

Segundo a EP (2009) o elastómero a utilizar deve conter na sua formulação os seguintes componentes: policloropreno (com percentagens não inferiores a 60%), negro de fumo (com percentagens inferiores a 25%) e adjuvantes (com percentagens inferiores a 15%) e deve

obedecer a um conjunto de características de qualidade, que seguem no Quadro 3.2, com os respectivos valores limites impostos pelas normas.

Remberger (2002) classifica os materiais elastoméricos em duas categorias: numa primeira categoria os constituídos por policloropreno ou borracha de etileno-propileno, com alta resistência ao rasgar ou à propagação de fissuras, cuja espessura não deve de ser inferior a 4 mm e numa segunda categoria os elastoméricos constituídos por policloropreno ou borracha natural em perfis.

Quadro 3.2 – Características dos materiais elastoméricos (EP, 2009)

| Critério | Características de qualidade |
|------------------------------------|------------------------------|
| Rigidez Shore | $60^{\circ} \pm 5$ |
| Resistência à tração | $> 17 \text{ N/mm}^2$ |
| Alongamento na rotura | $> 450\%$ |
| Deformação residual sob compressão | |
| - a 70°C, durante 24 horas | $< 15\%$ |
| - a 22°C, durante 28 horas | $< 15\%$ |

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Sistema de Geração de Energia Elétrica da *Waydip*

Anteriormente, na revisão da literatura sobre sistemas de geração de energia foi descrito muito resumidamente o sistema *Waynergy Vehicles* desenvolvido pela *startup* portuguesa *Waydip*, fundada em outubro de 2010 e sediada na Covilhã, local onde foi implementado o sistema piloto. Neste subcapítulo são abordadas em maior detalhe as características e método de funcionamento do sistema para o qual se pretende estudar o material mais adequado para revestir a superfície de cada módulo.

O *Waynergy Vehicles* é um sistema eletromecânico, implementado no interior do pavimento, que permite a transformação de energia mecânica proveniente do movimento dos veículos em energia elétrica e que para ser acionado necessita da presença de uma carga. A quantidade de energia elétrica gerada depende de vários fatores, entre os quais a carga, correspondente ao peso do veículo, a velocidade do mesmo, o deslocamento vertical e a forma da superfície. Estudos recentes (Cravo, 2014) demonstram ainda que a existência de travagem sobre os módulos também tem influência.

A energia gerada poderá ter diferentes utilidades, designadamente para uso no próprio local, armazenamento ou injeção na rede. Pretende-se, assim, que os principais clientes sejam entidades que tutelam a rede e infraestruturas rodoviárias, parques de estacionamento, centros comerciais, ou seja, todos os locais de grande afluência de veículos e com importantes necessidades energéticas.

4.1.1 Evolução das características dos módulos do sistema

De acordo com os objetivos de cada cliente, é possível associar vários módulos. Inicialmente cada módulo foi feito para ter 3 m (largura da via, no mínimo) por 1 m (comprimento do módulo), cuja configuração é apresentada na Figura 4.1 (Waydip, 2014).

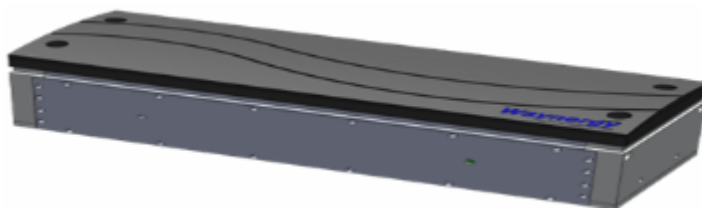


Figura 4.1 – Configuração inicial do módulo do sistema *Waynergy Vehicles*.

Posteriormente, estas dimensões foram alteradas, passando cada módulo a ter dimensões de 0,8 m×0,7 m e a superfície de 1 m×1 m. Na sua mais recente versão, cada módulo tem 1,5 m×1 m, sendo colocados dois módulos lado a lado, de forma a preencher toda a largura da via. A principal alteração é ao nível da superfície de cada módulo, a qual se pretende subdividir em cinco partes, cada uma com 20 cm de comprimento.

Relativamente ao número de geradores por módulo, existe a possibilidade de serem incorporados um máximo de quatro. Essa decisão depende do tipo de utilização, bem como da quantidade de energia que se pretende obter e do investimento que se pretende realizar, uma vez que um módulo onde são incorporados quatro geradores tem custos mais elevados.

O sistema é constituído por um bloco com uma parte fixa e uma parte móvel. Da parte fixa faz parte a base inferior, que assenta na camada de base do pavimento no local de aplicação pretendido. A parte móvel diz respeito à superfície, sendo esta a componente do sistema que estará em contato com os veículos.

4.1.2 Descrição do modo de funcionamento do sistema

Para um melhor entendimento do funcionamento do sistema *Waynergy Vehicles*, recorre-se à sua representação esquemática através da Figura 4.2 (Duarte e Casimiro, 2011). A representação de um módulo com dois geradores justifica-se, por um lado, por ser a configuração adotada no sistema piloto e, por outro, devido aos resultados dos testes experimentais que permitiram concluir que esta seria a melhor configuração no que diz respeito à maximização de energia gerada.

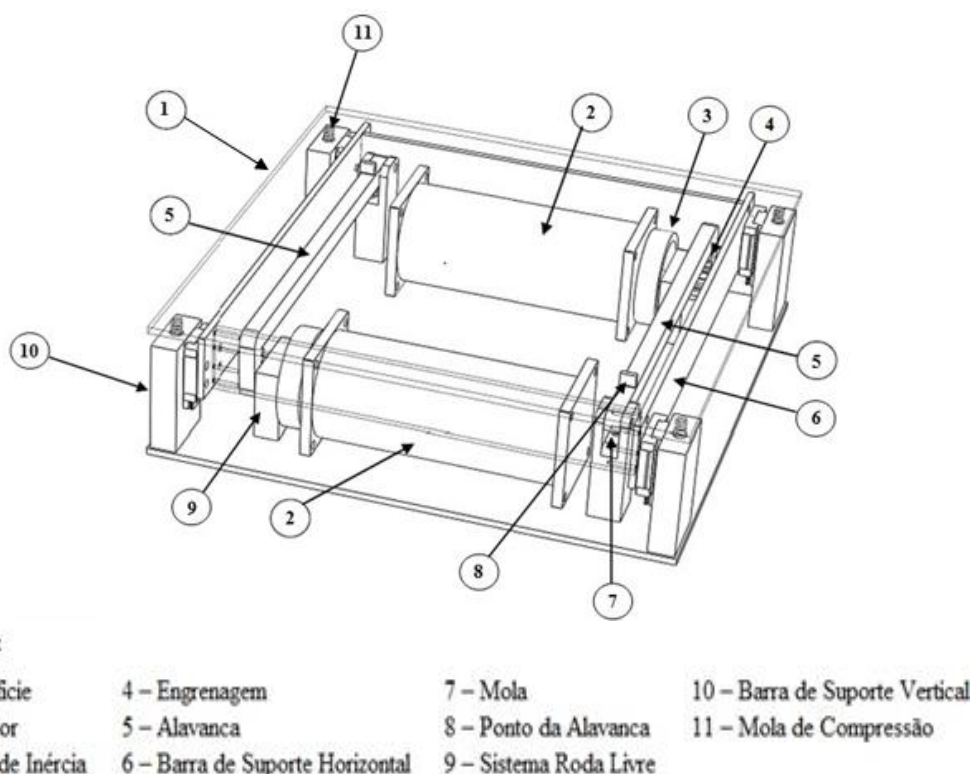


Figura 4.2 – Funcionamento do sistema *Waynergy Vehicles*.

Quando é aplicada uma carga sobre a superfície (1), esta move-se no eixo vertical e o movimento linear da superfície aciona uma alavanca (5) num determinado ponto (8). A carga, ao ser aplicada num ponto próximo de uma das extremidades da alavanca (zona de rotação), irá provocar um pequeno deslocamento nesse ponto, que é aumentado e provoca um movimento maior na extremidade da alavanca mais distante do ponto de aplicação. Esta extremidade está ligada a um sistema de engrenagens (4), permitindo assim que se converta o movimento linear da superfície num movimento rotacional. O conjunto de engrenagens encontra-se ainda ligado ao veio gerador (2), que irá rodar a uma velocidade tal que permita a geração de eletricidade.

O mecanismo integra ainda um sistema de “roda livre” (9) de modo a que a alavanca provoque o movimento do veio apenas quando desce e impeça que se inverta o movimento do veio quando sobe, sob a ação de uma mola (7). De forma a prolongar a continuidade do movimento, é acoplado ao veio gerador uma roda de inércia (3), a qual possibilita que em intervalos de passagens de veículos, o veio do gerador não pare de rodar, ou que no limite, o seu tempo de paragem seja prolongado, maximizando a energia gerada.

Para que a superfície móvel (1) volte à posição inicial, isto é, à mesma cota que o restante pavimento, após a passagem do veículo, é utilizada uma mola de compressão (11) em cada um dos cantos (10) (Duarte e Casimiro, 2011).

4.1.3 Fatores que influenciam a geração de energia

Conforme foi exposto anteriormente, existem diversos fatores que influenciam a geração de energia para o sistema. Seguidamente são descritas, muito sucintamente, as principais conclusões aferidas a partir de testes experimentais anteriormente realizados.

No que respeita ao deslocamento vertical, para valores até 15 mm, verifica-se que há um ganho gradual de energia gerada. Porém, continuando a aumentar o valor do deslocamento (até 20 mm), apesar da diferença continuar a ser positiva, o ganho de energia deixa de ser um valor compensatório, na medida em que começa a afetar claramente a segurança e o conforto dos condutores.

Conclui-se, também, que quanto maior for a carga aplicada sobre os módulos, isto é, o peso do veículo, maior será a energia gerada, pois a uma carga maior corresponde um deslocamento vertical também maior, o que origina um maior número de rotações do veio gerador. Quanto à velocidade de circulação, verificou-se que a geração de energia é maximizada para o intervalo entre os 30 km/h e os 50 km/h (Cravo, 2014).

A relação da forma da superfície com a quantidade de energia gerada será abordada no subcapítulo seguinte.

4.2 Materiais Mais Adequados Para Revestir a Superfície do Waynergy Vehicles

Tratando-se de um sistema inovador, na conceção e desenvolvimento do sistema *Waynergy Vehicles* incidiu-se especialmente na sua vertente eletromecânica de forma a corresponder às expectativas de geração de energia elétrica. Porém, aquando da implementação do sistema piloto na Covilhã, ficou claro que é necessário estudar com maior rigor a componente do revestimento de cada módulo. Este revestimento, estando em contacto direto com pneu, deverá dar resposta não só às necessidades dos condutores, garantindo a sua segurança e comodidade, assim como deverá maximizar a eficiência do sistema, uma vez que seja qual for o material escolhido, existirá sempre energia absorvida e portanto desaproveitada.

No capítulo 3, foi feito numa primeira fase um estudo pormenorizado dos diversos materiais que são comumente utilizados na camada superficial dos pavimentos rodoviários (misturas betuminosas aplicadas a camadas de desgaste e revestimentos anti-derrapantes) e, numa segunda fase, os materiais pelos quais são constituídos dispositivos também utilizados em pavimentos (lombas reductoras de velocidade e juntas de dilatação). Em ambas as fases, foram estudadas as propriedades e características dos vários materiais, tendo sido feito à priori o seu

enquadramento legal, essencialmente no que respeita a normas de certificação e requisitos técnicos e legais. Esta recolha de informação é da maior importância, uma vez que o material a adotar para a superfície do módulo deverá estar em conformidade com os termos técnicos e legais que permitam a sua instalação em pavimentos rodoviários.

De modo a salvaguardar a qualidade dos pavimentos rodoviários há que satisfazer diversos critérios e exigências, designadamente de segurança e comodidade, de durabilidade, de resistência à fadiga, de aderência (qualidades antiderrapantes), de impermeabilidade e de nível de ruído. Assim, o material ideal a adotar para revestir o sistema será aquele que assegure as características descritas para uma superfície comum, sendo obviamente garantidos os critérios de economia, durabilidade, facilidade de execução e de eficiência do sistema.

Foram estudados vários materiais atendendo à configuração do sistema piloto bem como à configuração da nova versão em desenvolvimento pela *Waydip*. Na primeira configuração, a superfície é composta por placas de alumínio, incidindo-se aqui no estudo de um material indicado para o revestimento dessas mesmas placas. Para a segunda configuração constatará apenas um material, a borracha.

4.2.1 Soluções testadas no Sistema Piloto

Uma solução que à primeira vista parecia ser mais simples e até mais económica, tendo sido já testada pela *Waydip*, foi a aplicação de marcas rodoviárias transversais sobre as placas de alumínio dos módulos do sistema, materializadas através de uma tinta branca da Sociedade Nacional de Sinalização Vertical (SNSV). No entanto, a tinta testada pela *Waydip* revelou ser uma solução inadequada, uma vez que não cumpria dois dos critérios referidos no ponto 3.1.4 desta dissertação, afetando assim o seu comportamento. Verificou-se que em pouco tempo a tinta tinha sofrido um desgaste bastante acentuado, conduzindo à sua degradação e, inevitavelmente, ao seu desaparecimento, ficando a placa de alumínio de novo em contato com os rodados dos veículos. Por outro lado, também a aderência da tinta se revelou insuficiente, pois não garantia coeficientes de atrito adequados, principalmente em tempo de chuva, colocando um grave problema do ponto de vista da segurança de circulação, com uma resistência à derrapagem muito baixa. Nesse sentido, foi também medido coeficiente de atrito da tinta testada através do teste do Pêndulo Britânico, de acordo com a EN 13036-4, tendo-se verificado que o valor para o mesmo era inferior ao valor de referência (0,55 PTV) estabelecido no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP, 2009).

Outro aspeto importante prende-se com o facto de não existir ainda uma tinta que tenha aplicação adequada sobre o alumínio, pois geralmente, a sua aderência ao próprio alumínio é limitada e, além disso, a elevada condutividade térmica deste faz estalar a tinta.

Um segundo teste experimental da *Waydip* foi recorrer a uma mistura com aglomerados da 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) recorrentemente utilizada na selagem de fendas e juntas em pavimentos. Tendo em conta as suas características e apesar de ser uma solução tecnicamente apelativa, é desvantajoso do ponto de vista económico devido ao seu elevado custo, pelo que esta opção não se apresentou viável.

Devido ao elevado número de juntas de dilatação incorporadas nas diversas Obras de Arte, também estes dispositivos foram estudados no que respeita aos materiais pelos quais são constituídos, que são essencialmente o aço e os elastómeros (borrachas). Materiais como o aço e o ferro, este último recorrentemente utilizado em dispositivos de fecho e sumidouros, foram desde logo excluídos do leque de opções a contemplar na simulação numérica, descrita posteriormente, devido aos seus elevados pesos específicos. Por outro lado os elastómeros são materiais que devido às suas características, nomeadamente de resistência às variações ambientais, ao sal de degelo e às águas alcalinas e ácidas, se podem tornar numa solução interessante para o revestimento dos módulos.

No capítulo 3 foram abordadas as lombas redutoras de velocidade (LRV), cujo estudo se justificou pela importância de se fazer o seu enquadramento técnico e legal de forma a avaliar a viabilidade da solução, atendendo que estas podem surgir isoladas ou em grupo e nas formas sinusoidal, trapezoidal e circular.

Outro fator que motivou o estudo destes dispositivos foram os resultados experimentais realizados através do *software* de simulação numérica, o MATLAB, a partir dos quais se concluiu que, para as mesmas condições de peso do veículo (1350 kg) e máximo deslocamento vertical (15 mm), a energia gerada pelo sistema é superior numa superfície côncava relativamente a uma superfície plana, tendo como referência velocidades entre os 20 e 40 km/h. As figuras seguintes, 4.3 e 4.4, apresentam os resultados da simulação numérica para a superfície plana e côncava, respetivamente.

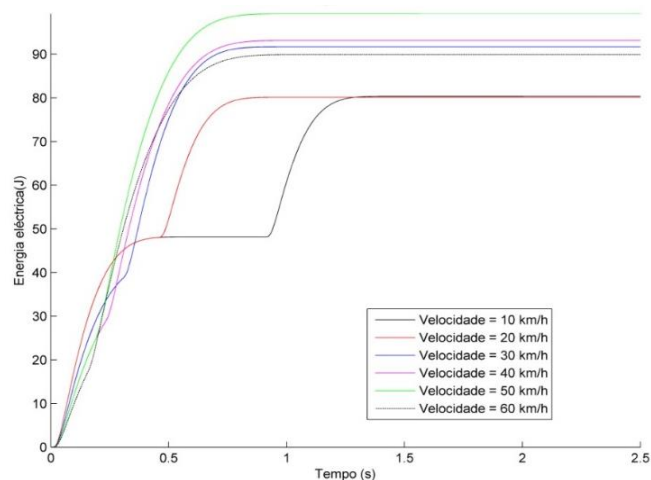


Figura 4.3 – Energia gerada numa superfície plana.

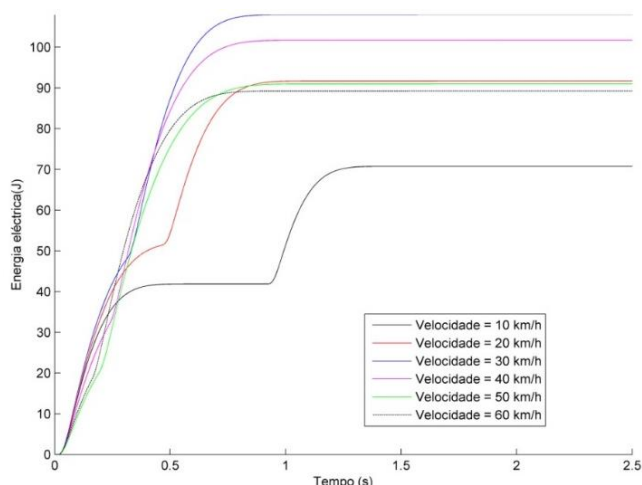


Figura 4.4 – Energia gerada numa superfície côncava.

Numa superfície plana, a maior quantidade de energia é gerada a partir dos 40 km/h, rondando o intervalo de 90 a 100 J, enquanto que numa superfície côncava, a energia gerada pode atingir os 110 J, embora tal ocorra para menores velocidades de circulação, 30 km/h. Assim, da análise dos gráficos, conclui-se desde logo que a instalação de uma superfície côncava sobre os módulos condiciona a velocidades de circulação a valores entre os 20 e os 40 km/h.

Considerando a adoção de uma superfície côncava, foi necessário estudar o seu impacto no âmbito da engenharia de tráfego, de forma a que seja garantido um movimento eficiente e seguro das pessoas e bens na rede viária, no local onde for implementado o sistema de geração de energia. Neste sentido, a *Waydip* efetuou um estudo envolvendo a aplicação de uma LRV, no qual se fixou a lomba na placa de alumínio (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Módulos do *Waynergy Vehicles* revestidos por LRV.

A aplicação de lombas é, por vezes, desaconselhada devido aos danos físicos causados nos veículos, devido ao desconforto causado nos condutores e ao aumento da poluição sonora. O ruído provocado pelo veículo no atravessamento da lomba, conjugado com o ruído proveniente do próprio sistema de geração de energia, é um fator que não pode ser menosprezado, sendo uma das principais queixas não só dos utilizadores da Alameda Pêro da Covilhã, onde o sistema piloto foi implementado, mas também dos habitantes da área envolvente.

A aplicação de uma LRV depende sobretudo da hierarquia da via, das condições locais, do tráfego de atravessamento e da importância do trecho em termos estratégicos para os utilizadores considerados prioritários. Se a configuração do sistema de geração contemplar apenas um módulo e as características da via onde este seja incorporado forem ao encontro das condições de aplicação citadas, a fixação de uma LRV poderia ser uma alternativa viável. A redução de velocidade, associada à travagem do veículo, proporciona uma maior pressão no pavimento, aumentando a força vertical que faz deslocar a superfície do módulo e a velocidade com que a superfície desce, gerando mais energia.

Mas neste caso, com a fixação da lomba, aquando do embate do pneu do veículo e a face inclinada da lomba, são geradas forças no sentido do pavimento e, portanto, tangenciais à superfície do módulo, provocando esforços para os quais a estrutura mecânica não foi dimensionada comprometendo assim a durabilidade do sistema.

Outro efeito secundário da fixação de lombas seria a redução do fluxo de veículos a circular na via, com a sua redistribuição por arruamentos adjacentes sem lombas. Uma vez que a produtividade do sistema depende fortemente do fluxo de veículos, o recurso a uma solução deste género limitaria muito a escolha do local de implementação.

Sendo expectável que a configuração do sistema seja obtida pela junção de vários módulos, como é o caso do sistema piloto, formado pela associação de cinco módulos, o revestimento dos módulos com uma lomba (Figura 4.5) iria contra a Nota Técnica da DGV que estipula que a distância entre duas lombas consecutivas deve estar compreendida entre 40 e 150 m.

Além das lombas em borracha da 3M, a *Waydip* testou ainda uma solução envolvendo lombas de madeira de pinheiro marítimo, um material com um módulo de elasticidade superior ao da borracha e que por isso absorve menos energia, conduzindo assim a um aumento do rendimento do sistema. Porém, também esta alternativa não se afigura como uma solução viável devido ao material ter apresentado vários problemas, designadamente a sua rápida degradação, a pouca atratividade do ponto de vista da segurança e conforto do utilizador, a inadequada resistência à derrapagem em tempo de chuva e outras características como a impermeabilização.

4.2.2 Possíveis soluções alternativas

Até agora foram descritas soluções que perante as várias abordagens se revelaram inexecutáveis. Neste subcapítulo, expõem-se as possíveis soluções alternativas para o revestimento dos módulos para ambas as configurações descritas no início do ponto 4.2.

4.2.2.1 Simulação da aderência e textura na placa de alumínio

Uma primeira solução passa por simular a aderência, textura e rugosidade de um pavimento rodoviário na própria placa de alumínio. A aderência na placa é necessária para poder acelerar e desacelerar sobre os módulos, se necessário, e resulta do atrito entre os pneus dos veículos e a placa de alumínio. Se o atrito gerado for insuficiente perde-se aderência e, portanto, o controlo da manobra pretendida. A resistência à derrapagem pode ser determinada através do ensaio do Pêndulo Britânico, cujo valor deverá ser igual ou superior ao mínimo estabelecido, para que a solução possa ser adotada.

Também a textura é necessária, uma vez que esta desempenha um papel determinante para a qualidade funcional da resistência ao movimento, contribuindo, ainda que indiretamente, no desenvolvimento das forças de atrito no contato pneu-alumínio, tanto em condições secas como molhadas. Tem também influência direta na capacidade de evacuação das águas pluviais, um aspeto que não tinha sido ainda referido, mas que também é necessário ter em conta na escolha do material. A determinação da textura de uma superfície pode ser feita através de vários ensaios: (i) ensaio da Mancha de Areia, (ii) CTM (Circular Texture Meter) ou (iii) ensaio com raio laser, geralmente realizado com equipamento de designação genérica Rugolaser.

Quanto à dissipação de energia, mantendo a placa de alumínio, prevê-se que esta seja insignificante, dado que a solução transmite praticamente toda a energia captada para o sistema

de conversão elétrica, devido ao seu elevado módulo de elasticidade (aproximadamente 70 GPa).

Depois de realizados os testes experimentais, caso sejam garantidos bons níveis de segurança e conforto aos condutores, a simulação da aderência e da textura no alumínio pode ser uma alternativa viável. Porém, esta solução não é nem economicamente nem tecnicamente apelativa, uma vez que o alumínio, devido à sua elevada condutibilidade térmica, quando sujeito a elevadas temperaturas, conduz a um maior desgaste dos componentes do sistema, aumentando os custos de manutenção.

4.2.2.2 Aplicação de um revestimento antiderrapante sobre os módulos

Uma segunda solução alternativa, já abordada no ponto 3.1.2, passa pela aplicação de um revestimento antiderrapante. É uma solução interessante devido às suas características, nomeadamente, resistência mecânica, resistência química e durabilidade. Outro aspeto muito importante é o facto deste tipo de revestimento poder ser aplicado tanto sobre o betuminoso como sobre o alumínio, além de aumentar substancialmente o coeficiente de atrito, assegurando a impermeabilização.

O fato de ser constituído por uma resina de poliuretano confere à mistura uma elasticidade que pode evitar as fissuras causadas pelo diferencial térmico e proporciona o acompanhamento das vibrações e dilatações do alumínio. Quanto ao acabamento, pode ser natural ou colorido, e sendo colorido, constitui ainda um importante alerta visual para o condutor de que se aproxima de uma área que exige especial atenção, induzindo à redução da velocidade de circulação, o que é também favorável ao sistema de geração de energia, como já foi referido.

Tratando-se de uma superfície de alumínio, para garantir a aderência entre o revestimento e o alumínio, exige-se um tratamento prévio com recurso a técnicas de abrasão mecânica. O método mais comum é o uso de jato chumba sobre a superfície. Alternativamente, em áreas lisas, uma boa aderência pode ser obtida pelo processo de esmerilamento áspero com uma esmeriladora angular. Após um destes processos, está-se em condições de espalhar o ligante sobre as placas dos módulos.

A avaliação das propriedades funcionais do revestimento antiderrapante está dependente da realização de ensaios padronizados que permitam medir a resistência à derrapagem e a profundidade de textura, como é o caso do teste do Pêndulo Britânico e do teste da Mancha de Areia. Não tendo sido possível realizar estes ensaios em tempo útil, optou-se por recorrer aos resultados de estudos realizados por Menezes (2008), onde se comprovou que o coeficiente de atrito medido através do ensaio do Pêndulo Britânico (0.78 PTV) é substancialmente superior ao valor de referência estipulado no caderno de encargos da EP (0.55 PTV).

Esta solução só poderá ser validada mediante duas condições: (i) garantia de aderência do material do revestimento ao alumínio, que apesar de ser dada nas várias fichas técnicas consultadas, carece ainda da realização de testes experimentais para se ter uma ideia mais segura da durabilidade da sua aderência; (ii) conhecer o módulo de elasticidade (E) do revestimento antiderrapante. Sendo E uma propriedade mecânica de materiais sólidos, não é possível avaliar o impacto do material na modelação do sistema. Contudo, tratando-se de um revestimento de espessura reduzida (cerca de 4 mm), é expectável que sejam praticamente nulas as perdas de energia.

4.2.3 Importância do conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais

Na abordagem das possíveis soluções, incidiu-se, sobretudo, nas características superficiais de aderência e textura que o revestimento dos módulos deverá ter, sendo estes os aspetos que mais interessam no âmbito da Engenharia Civil. Todavia, tratando-se de um sistema de geração de energia, é da maior importância que se adote um material que absorva o mínimo de energia possível, garantindo igualmente que a energia captada seja transmitida numa percentagem suficientemente satisfatória para o sistema de conversão de energia elétrica. Assim, é necessário escolher o material tendo em conta as suas características funcionais em contacto com o pneu do veículo e também, atendendo às suas propriedades mecânicas.

A propriedade mecânica que mais influência a absorção de energia é o E , sendo este um parâmetro que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. É uma propriedade intrínseca dos materiais, dependente da composição química, microestrutura e defeitos, que pode ser obtida através do cociente entre a tensão exercida (σ) e a deformação (ε) sofrida pelo material (Equação 1).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Genericamente, valores elevados de E associam-se a materiais de baixa elasticidade. Pelo contrário, valores reduzidos de E correspondem a materiais de elevada elasticidade, como é o caso a borracha. Daí a sua elevada deformabilidade.

Apesar dos inconvenientes da borracha, já referidos anteriormente, associados à sua elevada deformabilidade, os investigadores da *Waydip* apontam o revestimento com um determinado tipo de borracha como o mais promissor, por ser leve e fácil de fabricar (fator económico também influente), além das inúmeras propriedades físicas, químicas e tribológicas favoráveis à sua escolha, designadamente a excelente resistência à abrasão, resistência a produtos químicos, resistência térmica e resistência ao envelhecimento.

Além das propriedades já referidas, existem outros fatores que potenciam a escolha da borracha. Inicialmente foram estudados os materiais mais adequados para revestir a superfície móvel de cada módulo do sistema, cuja superfície seria composta por placas de alumínio, como acabou por ser a configuração do sistema piloto da Covilhã. O alumínio constitui uma boa solução para um sistema como o piloto, em que é a superfície que se desloca, ou seja, as cargas são transferidas para o sistema de conversão de energia através desse deslocamento vertical.

Contudo, esta é uma solução que revelou alguns inconvenientes: (i) os problemas referidos no ponto 4.2.1, associados ao ruído e aos custos de manutenção; e (ii) a instalação deste sistema ser bastante dispendiosa, uma vez que para a sua instalação é necessário cortar o pavimento e proceder à sua abertura com profundidade suficiente para colocar as peças de betão armado que servem de suporte base para a fixação de cada módulo, de modo a que a superfície dos módulos fiquem ao mesmo nível da superfície do pavimento rodoviário. Na Figura 4.6 são visíveis as peças de betão armado e a superfície em alumínio.



Figura 4.6 – Colocação das peças de betão armado no interior do pavimento.

Os onerosos custos de manutenção devem-se, sobretudo, à necessidade de ser feita nova abertura do pavimento envolvente, com inevitável incómodo para os utilizadores da via em questão, onde terá de ser obrigatoriamente cortado o acesso ao trânsito.

Assim, por forma a superar as lacunas do sistema inicialmente projetado, está em estudo, por parte da *Waydip*, uma nova configuração com as seguintes características: (i) a superfície transmite as cargas dos veículos, não através de um sistema vertical, mas através de uma deformação do material da qual é constituída, reduzindo o impacto do veículo com a interface do sistema e o ruído causado pelo deslocamento vertical; (ii) as componentes do sistema têm maior durabilidade, diminuindo assim os custos de manutenção. Tratando-se de um novo sistema, em processo de patente, não será possível publicar na presente dissertação qualquer representação esquemática das suas componentes.

Nesse sentido, estudou-se aprofundadamente os vários tipos de borracha existentes no mercado, recolhendo para cada tipo as suas propriedades físicas, químicas e tribológicas, tanto quantitativamente como qualitativamente (Anexo B). Estudou-se a borracha natural, assim como as borrachas sintéticas mais comuns como a borracha de butadieno estireno (SBR), a borracha de poliuretano (PU), a borracha de polisopreno (IR), a borracha de polibutadieno (BR) e a borracha de policlocopreno (CR).

No caso da borracha, em face da não proporcionalidade entre tensões e deformações, o módulo de elasticidade é definido para cada percentagem de alongamento, isto porque a curva de tensão-deformação tem o aspeto da Figura 4.7.

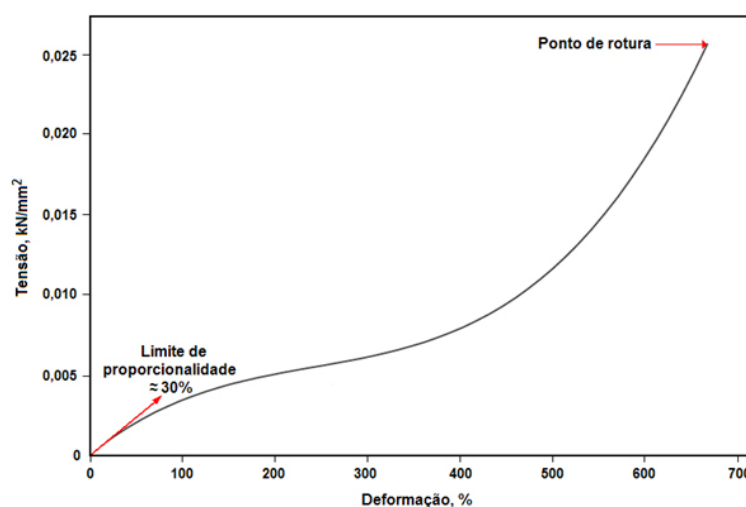


Figura 4.7 – Curva tensão-deformação de uma borracha.

Admite-se então que apenas existe uma zona de proporcionalidade entre tensões e deformações (Lei de Hooke) até uma deformação de aproximadamente 30% (deformação muito pequena para a borracha). Como se vê, ao longo da curva o módulo de elasticidade é variável, representando a inclinação da tangente em cada ponto da curva. Por isso, o valor do módulo só terá sentido se for acompanhado do valor da deformação, isto é, da percentagem de alongamento, desde 100%, 200%, 300%, e assim sucessivamente. A borracha quando submetida a esforços de tração à temperatura ambiente, pode apresentar deformações da ordem de 1000% ou mesmo superiores, até atingir a rotura.

Ao comparar as propriedades dos seis tipos de borrachas (Anexo B), conclui-se que estas são, regra geral, bastante similares. A escolha de uma em detrimento de outras acaba por ser um processo ambíguo, uma vez que as propriedades das borrachas variam bastante, sendo que, para fins específicos de engenharia e dimensionamento, os valores genericamente tabelados servem apenas de base a um estudo preliminar. Esta seleção deverá ser feita, idealmente, de acordo com a indicação fabricantes e fornecedores destes materiais, com base em informação rigorosa, e

avaliando-se a possibilidade da borracha ser fabricada propositadamente para o projeto em causa, de forma a serem obtidas as características desejadas.

Neste sentido, a maior dificuldade passa por definir o módulo de elasticidade da borracha a utilizar na modelação, já que esta é uma propriedade que depende da percentagem de alongamento. De forma a ultrapassar essa dificuldade, adotaram-se dois tipos de borrachas: uma com uma percentagem de alongamento de 300% e outra com 600%, correspondendo a um módulo de elasticidade de 6,1 MPa e 17 MPa, respetivamente. Esta escolha justifica-se na medida em que será possível tirar as devidas conclusões no que respeita à evolução da quantidade de energia absorvida no material quando varia o respetivo E , além de se fazer variar também os restantes fatores que influenciam a eficiência do sistema, que serão descritos de seguida.

Concluída a análise aos vários materiais, refira-se novamente, que a solução a adotar só pode ser validada mediante o conhecimento do módulo de elasticidade do material, para que seja possível avaliar as perdas associadas, bem como a possibilidade de medir a aderência e textura, através dos ensaios do Pêndulo Britânico ou da Mancha de Areia. Assim, os materiais que asseguram as condições anteriores são o alumínio, para um sistema em que a superfície se desloca, e a borracha para um sistema em que a superfície se deforma.

4.3 Modelação do Comportamento do Material

A modelação, desenvolvida no *software* Excel, tem por objetivo identificar o material de revestimento mais adequado para a transmissão das cargas para a base do sistema com a menor percentagem de perdas, através da variação do seguinte conjunto de parâmetros de entrada do modelo: o peso do veículo (m), a velocidade de circulação (v), o comprimento da superfície (L), o deslocamento vertical sofrido pela superfície do sistema (h) quando se trata de alumínio ou deformação quando se trata da borracha e, por fim, o módulo de elasticidade do material (E).

O conhecimento prévio do módulo de elasticidade é fundamental, já que é o dado de partida para o cálculo da energia absorvida pelo material. A Equação (1) é equivalente à Equação (2).

$$E = \frac{F}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (2)$$

Onde F é a força exercida pelo veículo; A é a área da seção através da qual é exercida a tensão, isto é a área do pneu; Δl é a variação da espessura do material e l_0 é o deslocamento vertical da placa.

Assim conhecendo E , calcula-se facilmente a variação da espessura do material (Δl). Sendo conhecido este parâmetro, obtém-se a energia absorvida pelo material, a partir da equação (3), que não é mais do que a aplicação da equação da energia potencial:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \Leftrightarrow E_p = m \cdot g \cdot \Delta l \quad (3)$$

Onde m é a soma da massa da superfície com a massa do veículo e g é a aceleração da gravidade (9.80665 m/s^2).

Os principais *outputs* do modelo são: (i) a energia total captada pela superfície, obtida através da soma da energia potencial com a energia cinética; (ii) a energia absorvida pelo material, obtida pela Equação (3); e (iii) a percentagem de energia perdida calculada pela equação (5).

A energia potencial E_p é calculada utilizando a Equação (3), sendo que aqui se utiliza o valor do deslocamento da superfície. Já a energia cinética é calculada utilizando a Equação (4):

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4)$$

Onde m é a soma da massa da superfície com a massa do veículo e v é a velocidade de circulação desse mesmo veículo.

Têm-se todas as condições reunidas para proceder ao cálculo da percentagem de energia perdida, que não é mais que o quociente entre a energia absorvida pelo material e a energia total captada pela superfície, ou seja:

$$\%E_{perdida} = \frac{E_{p_{perdida}}}{E_p + E_c} = \frac{E_{perdida}}{E_{total \text{ captada}}} \quad (5)$$

Foram feitas simulações para diferentes dados de entrada, cujos valores são indicados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Dados de entrada na modelação e respetivos valores.

| Dados de entrada | Gama de valores | Unidades |
|------------------------------------|--------------------------|----------|
| Peso do veículo (m) | 900; 1 350; 2 000; 3 500 | [Kg] |
| Velocidades de circulação (v) | 10 a 60 km/h | [km/h] |
| Comprimento da superfície (L) | 0.2; 0.25; 0.5; 1 | [m] |
| Deslocamento vertical da placa (h) | 5; 10;15 | [mm] |
| Módulo de elasticidade (E) | 6,10; 17,0;70 000,0 | [MPa] |

A influência da dimensão da superfície é um aspeto relevante, uma vez que a *Waydip* pretende alterar o comprimento de cada superfície de 1 m, subdividindo-a em cinco partes, passando a ter dimensões de 0,2 m×1,5 m, no intuito de aumentar o rendimento por módulo. Como cada uma destas sub-superfícies sofrerá um deslocamento vertical ao ser atuada, independente das restantes, justifica-se a simulação de quatro diferentes comprimentos para avaliar a evolução da captação de energia e respetivas perdas.

4.3.1 Análise aos resultados

Da Figura 4.8 constam os primeiros resultados da modelação, onde se pode observar, no eixo vertical, como varia a energia total captada pela superfície (*Energy In*) e a perdida no material (*Energy Lost*), em função do tempo, no eixo horizontal. Nas três situações estudadas, variou-se apenas o valor de E , tendo sido fixados os restantes parâmetros.

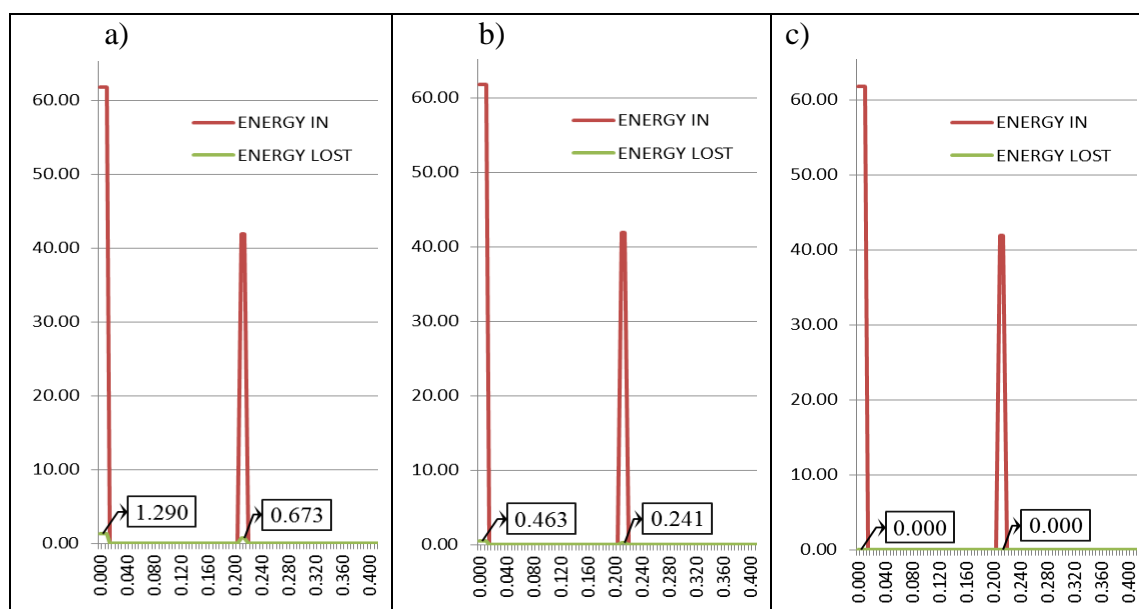


Figura 4.8 – Energia captada e perdida pelo material: a) $E=6,1$ MPa; b) $E=17,0$ MPa; c) $E=70,0$ GPa (para $v=50$ km/h; $L=0,20$ m; $h=15$ mm; $m=1350$ kg).

A escolha de 1350 kg para o peso do veículo justifica-se na medida em que este é o valor que melhor se enquadra no peso médio de um veículo e respetivos ocupantes. Devido à limitação do número de páginas da dissertação, optou-se por considerar apenas este valor na exposição e comparação de resultados, já que das várias simulações para os restantes pesos resultaram variações aproximadamente lineares.

Da observação da figura anterior é possível concluir que:

i) A energia total captada pela superfície mantém-se quando se faz variar o valor de E . A explicação prende-se pelo facto da energia captada não depender do módulo de elasticidade, mas sim dos restantes parâmetros.

ii) À medida que o módulo de elasticidade aumenta, mantendo os restantes dados de entrada constantes, é clara a diminuição da energia perdida no material (*Energy Lost*), de tal forma que a partir de um determinado E , deixam mesmo de ser registadas quaisquer perdas, como é o caso da Figura 4.8 c).

Ainda que, do ponto de vista da eficiência do sistema, o alumínio seja claramente o melhor material de entre os dois a validar na modelação, dado que toda a energia captada é transmitida para o sistema, os próximos sistemas desenvolvidos pela *Waydip* não terão este material na componente do revestimento. Nesse sentido, o estudo do comprimento da superfície, bem como do deslocamento ideal, teve de ser feito de acordo com o módulo de elasticidade de uma borracha.

Da comparação da energia captada com a energia absorvida, obtiveram-se percentagens de perdas na ordem dos 2,00% (Figura 4.8 a) e 0,75% (Figura 4.8 b), ambas no momento de impacto ($t=0$ s). Perante perdas tão pequenas e semelhantes, a escolha de um módulo de elasticidade fixo deixa de ser estritamente necessário, uma vez que depois das várias simulações concluiu-se que, mesmo para um baixo E e para todos os dados de entrada mais desfavoráveis, as perdas não são significativas, rondando os 2,00%.

A eficiência da componente do sistema em estudo não depende apenas do E do material. Outras variáveis como o comprimento do revestimento (L) e o deslocamento do material (h) são também importantes por terem influência direta na maximização da eficiência do sistema, além de que as variáveis como o peso dos veículos (m) e a velocidade de circulação (v) permitem estudar os locais mais propícios à sua instalação.

Uma vez que a modelação gera gráficos para cada dado de entrada, em função do tempo (Figura 4.8), a forma mais eficaz que se encontrou para avaliar a variação dos parâmetros foi compilar, em Excel, os resultados obtidos para cada energia captada e perdida na borracha (esta última em percentagem), em função das seis velocidades de circulação adotadas, considerando apenas para o momento de impacto dos pneus da frente do veículo. Concluído o tratamento de dados, procedeu-se à elaboração dos gráficos que servem de base ao estudo das características da superfície.

Na análise que se segue (Figura 4.9), fez-se incidir o estudo na influência da variação do comprimento da superfície (L) desde 0,2 m até 1,0 m.

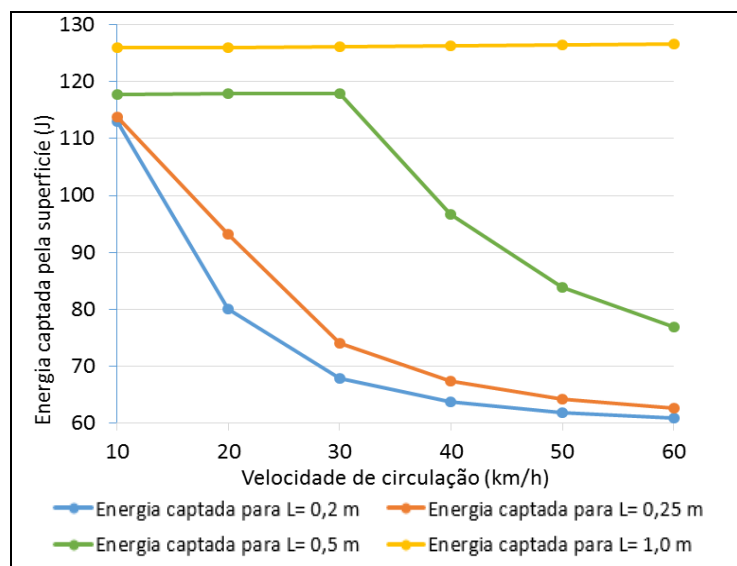


Figura 4.9 – Energia captada pela superfície para $m=1350$ kg, $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa.

Através da análise da Figura 4.9, verifica-se que, à medida que a velocidade aumenta, a energia captada tende a diminuir acentuadamente, com a exceção da superfície de 1,0 m. Estes resultados estão em consonância com o anteriormente exposto sobre a importância das velocidades reduzidas para a geração de energia. Analogamente, perante velocidades constantes, a menores comprimentos da superfície corresponde uma menor captação de energia, porque quanto maior for o comprimento da superfície em estudo, maior será a energia captada pela mesma, devido ao veículo que por ela passa ter mais tempo para libertar a energia que lhe está associada.

Um resultado interessante da figura prende-se com o comportamento da solução para a superfície de 1,0 m. Sendo previsível que esta solução fosse a que captasse mais energia, para toda a gama de velocidades, verifica-se que essa captação de energia não diminui com o aumento da velocidade. Este resultado pode ser explicado pelo facto deste tipo de superfície, em termos teóricos, ter um comprimento suficiente para que, dentro da gama de velocidades considerada, a captação de energia seja sempre máxima.

Para as mesmas condições, avaliou-se também como variam as perdas de energia na borracha, estando estas representadas na Figura 4.10.

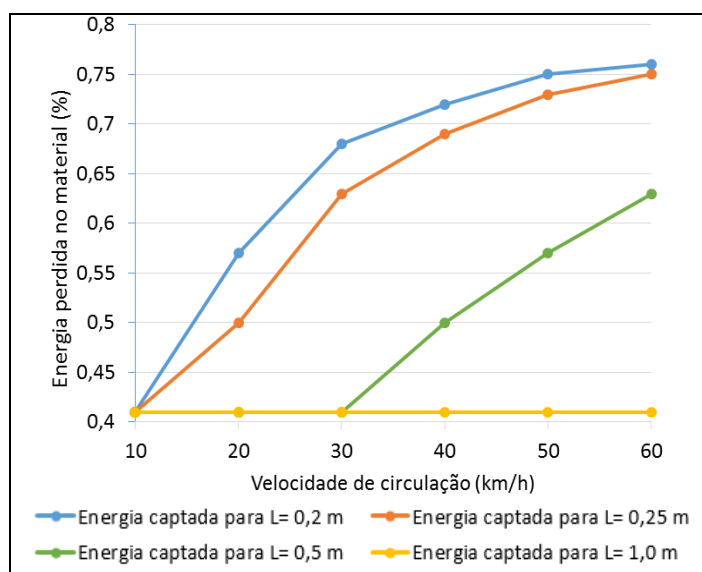


Figura 4.10 – Energia perdida na borracha para $m=1350$ kg, $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa.

Da observação da Figura 4.10, constata-se claramente que, para qualquer velocidade, quanto menor for a superfície, maiores serão as perdas de energia na borracha. Da mesma forma que na captação de energia, a superfície com $L=1,0$ m revelou ser a melhor solução. Também ao nível da energia absorvida pela borracha, os resultados foram em tudo similares, podendo-se verificar que, independentemente da velocidade, a dissipação de energia é residual e permanece constante.

Contudo é de grande importância ressaltar que o mais correto será fazer uma análise por metro de módulo. Considerando, por exemplo, a velocidade constante de 10 km/h e a sub-superfície de 20 cm, sendo possível colocar 5 destas “sub-superfícies” num metro (um único módulo) de forma a comparar diretamente esta solução com a solução de $L=1,0$ m, tanto a geração como as perdas de energia da primeira superfície terão de ser multiplicadas por 5, passando de 113 J de energia captada e 0,41% de energia absorvida para 565 J e 2,05%, respetivamente.

Porém, com o aumento da velocidade é diminuída a energia captada e são, conseqüentemente, aumentadas as perdas, ainda que pouco significativas, pelo que a solução envolvendo uma sub-superfície com 20 cm de comprimento conduz ao aumento do rendimento do sistema por módulo.

Numa segunda fase, foi analisada a influência do deslocamento da superfície do sistema considerando duas simulações uma com deslocamento de 15 mm e outra com deslocamento de 10 mm, ambas para $m=1350$ kg e $E=17,0$ MPa, cujos resultados podem ser observados na Figura 4.11. Ainda que também tenha sido feita a simulação para $h=5$ mm, os resultados não são apresentados graficamente, uma vez que o deslocamento obtido foi tão pequeno que apenas permitiu captar 23 J, excluindo-se desde logo esta opção.

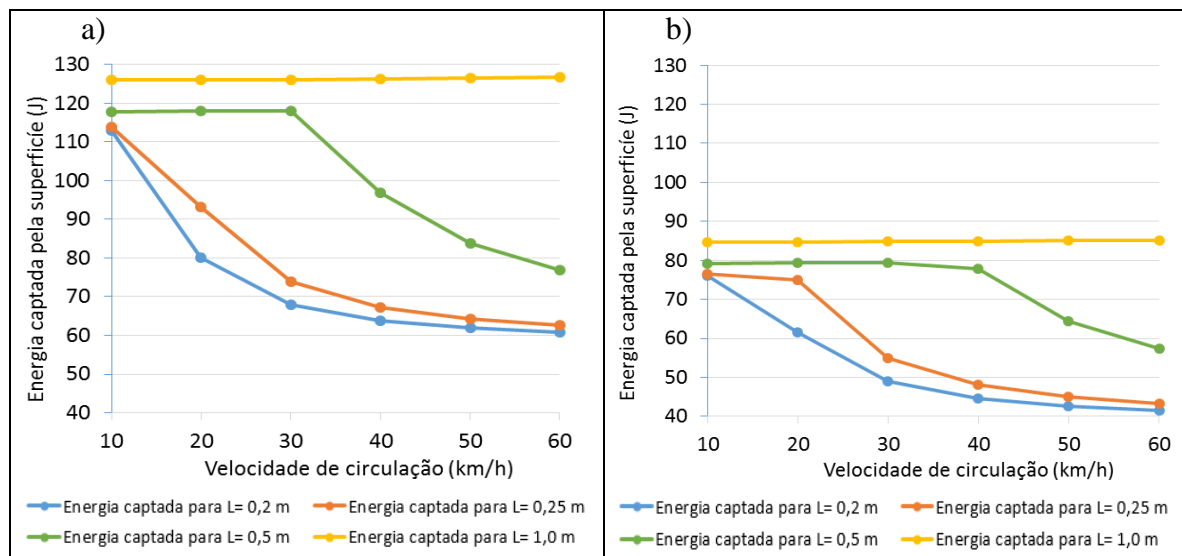


Figura 4.11 – Energia captada pela superfície: a) h=15 mm; b) h=10 mm.

Da observação da figura anterior é notória a diferença entre a energia captada quando se opta por um deslocamento de 15 mm em detrimento de um deslocamento de 10 mm. Sendo a energia captada a soma da energia potencial com a energia cinética provenientes do veículo, era expectável que essa diferença ocorresse, uma vez que a um aumento do deslocamento corresponde um aumento da energia potencial (Equação 3), sabendo que em ambos os casos, devido ao peso do veículo ser o mesmo, a energia cinética é constante para cada velocidade de circulação.

Complementando a análise anterior, avaliou-se igualmente a influência dos deslocamentos da superfície do sistema para as perdas de energia no material (Figura 4.12).

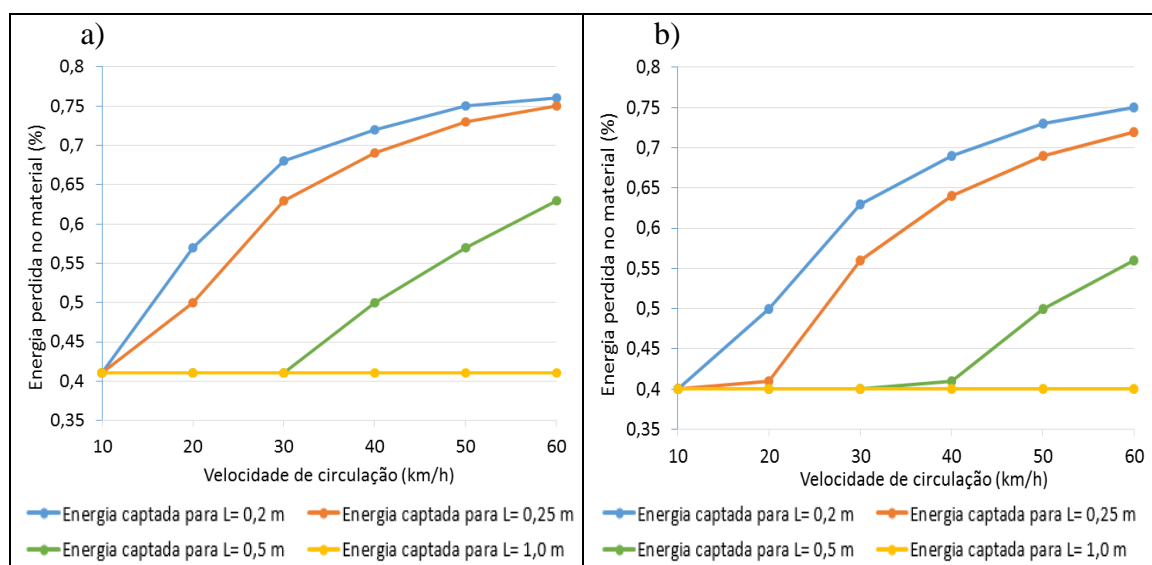


Figura 4. 12 – Energia absorvida pela borracha: a) h=15 mm; b) h=10 mm.

A figura anterior evidência que o deslocamento da superfície não tem uma influência significativa no que respeita à energia absorvida pelo material, sendo que para o caso mais desfavorável, isto é, para uma superfície com comprimento de 20 cm e para uma velocidade de 60 km/h, registam-se perdas na ordem dos 0,76% e 0,75% para deslocamentos de 15 mm e 10 mm, respetivamente.

Da análise conjunta das Figuras 4.11 e 4.12, conclui-se que a superfície do sistema de geração pode obter um maior rendimento sofrendo um deslocamento de 15 mm, na medida em que resulta numa maior captação de energia (126 J) face aos valores registados para o deslocamento de 10 mm (85 J).

A simulação para deslocamentos superiores a 15 mm não foi realizada por se considerar que, do ponto de vista da engenharia de tráfego, este valor não deverá ser ultrapassado, para que não seja posta em causa quer a segurança quer o conforto dos condutores.

A próxima análise diz respeito à influência do peso dos veículos na eficiência da componente do sistema em estudo. As Figura 4.13 contem gráficos onde se fez variar o peso dos veículos (m) relacionando-os com a velocidade de circulação.

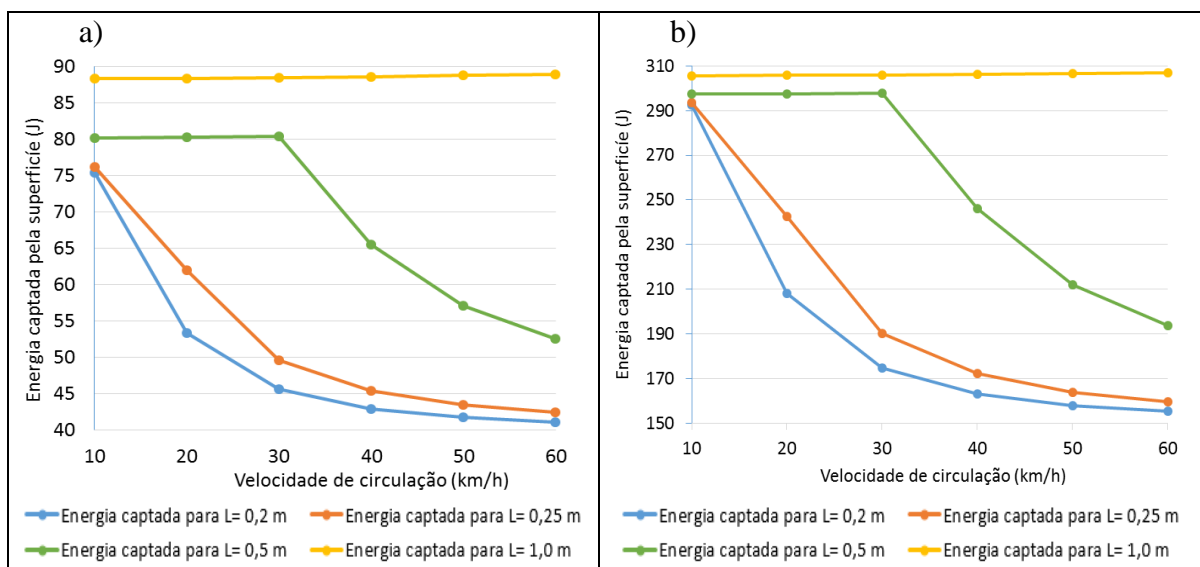


Figura 4.13 – Energia captada pela superfície: a) m=900 kg; b) m=3500 kg (para h=15 mm e E=17,0 MPa).

Quando um veículo com peso de 900 kg se desloca a uma velocidade de 10 km/h (favorável à maximização de energia captada) sobre a superfície do sistema, a energia máxima que este consegue gerar é de 88 J e de 76 J, para comprimentos dessa superfície de 1,0 m e 0,2 m, respetivamente. Aumentando o peso do veículo até ao limite de 3500 kg, pois acima deste valor

tratam-se já de veículos pesados com mais que dois eixos, e portanto fora do âmbito da modelação tratada, constata-se que a energia captada aumenta substancialmente. Nestas condições, a superfície consegue captar energias na ordem dos 306 J e 294 J. A diferença de valores obtida entre ambos os gráficos é mais que lógica, dado que a energia potencial e a energia cinética são proporcionais à massa do veículo.

A Figura 4.14 contém a evolução das perdas de energia na borracha para veículos com massa de 900 kg e 3 500 kg.

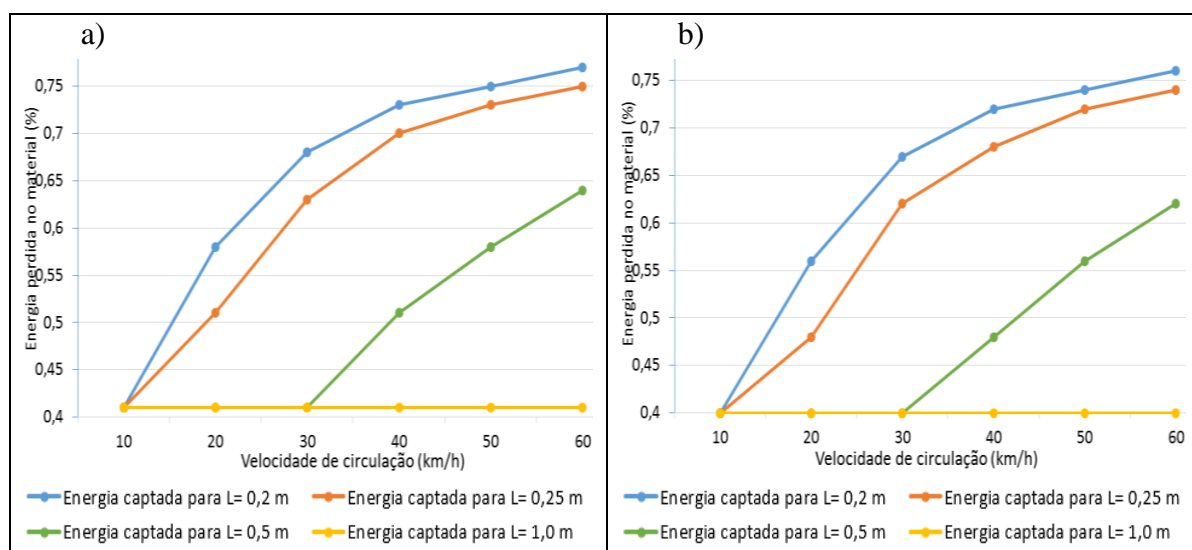


Figura 4.14 – Energia absorvida pela borracha: a) $m=900$ kg; b) $m=3500$ kg (para $h=15$ mm e $E=17,0$ MPa).

Da Figura 4.14 conclui-se que com o aumento da massa do veículo há uma redução muito ligeira e quase impercetível da percentagem de perdas, podendo-se considerar que estas se mantêm constantes para as duas massas de veículo.

4.3.2 Considerações finais

O estudo das várias simulações permitiu concluir que seja qual for o dado de entrada, o desempenho do revestimento será tanto melhor quanto menor for a velocidade de circulação, seja em termos de ganhos de energia pela superfície como de perdas no respetivo material.

Assim, tendo como objetivo a maximização da eficiência energética (captação, transmissão e conversão de energia) do sistema *Waynergy Vehicles*, será muito importante ter em conta as velocidades de circulação. Visto que o desempenho da superfície para a velocidade de 60 km/h se revelou bastante limitado (menor captação e maiores perdas de energia), a instalação deste sistema fora das localidades não será tão viável. Pelo contrário, a sua implementação será

adequada a localidades, cujo limite de velocidade é de 50 km/h, privilegiando zonas onde é necessário reduzir a velocidade, como é o caso das zonas de cedência de passagem, entradas de rotundas, portagens ou mesmo nas zonas imediatamente precedentes a LRV e passadeiras.

Na sequência da implementação em Portugal das zonas designadas “Zonas 30”, será pertinente o estudo da aplicação do sistema *Waynergy Vehicles* nestes locais, uma vez que estas zonas privilegiam velocidades de circulação muito reduzidas e aplicam-se a áreas residenciais com elevada atividade comercial ou na proximidade de equipamentos escolares.

A energia captada e posteriormente convertida em energia elétrica poderá ser utilizada, por exemplo, na alimentação de dispositivos elétricos, como placares de publicidade e semáforos ou outro tipo de alertas aos utentes da zona, promovendo a segurança rodoviária de forma sustentável. Contudo, sendo a diminuição do tráfego de atravessamento indesejado um dos objetivos das “Zonas 30”, este pode ser um fator imputável à diminuição do rendimento do sistema, já que este depende da quantidade de veículos que sobre ele se deslocam.

4.4 Estudo Experimental do Material Adotado com Equipamentos de Medida da Aderência

4.4.1 Generalidades

Face ao aumento da sinistralidade rodoviária em Portugal, é importante intervir na infraestrutura não só a nível de sinalização e traçado, como também ao nível das características funcionais do pavimento.

Apesar dos esforços desenvolvidos no sentido de reduzir os indicadores de sinistralidade rodoviária, estes são ainda significativos e continuam acima da média da União Europeia. É por este motivo que os pavimentos rodoviários devem obedecer a determinadas características funcionais e estruturais para que cumpram adequadamente a sua função. Portanto, interessa estudar o desempenho funcional ou superficial recorrendo a ensaios que permitem obter parâmetros como a textura e o atrito, não só ao longo da sua fase de exploração, mas também antes da colocação do material na rede viária, com o intuito de verificar se as características oferecidas estão em conformidade com o que é legalmente exigido.

O Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, juntamente com a *Waydip*, no sentido de averiguar a possibilidade de uma borracha ser fabricada de acordo com as propriedades específicas pretendidas, principalmente quanto ao módulo de elasticidade (E), contactou uma empresa especializada na área. A borracha da empresa é obtida por laminação de granulados de borracha reciclada de

pneus usados e resinas de poliuretano, possuindo as características adequadas de capacidade de absorção do impacto e deformação, de durabilidade, de capacidade de drenagem, de resistência à compressão e de ajuste à amplitude térmica, pelo que a sua escolha para o revestimento dos módulos do novo sistema foi inequívoca. Neste sentido, a empresa cedeu três amostras de diferentes borrachas para que o seu comportamento funcional pudesse ser validado em laboratório de forma a garantir a segurança e comodidade dos utentes.

Foram realizados dois ensaios para as três amostras cedidas, o Pendulo Britânico para medir o atrito, e o ensaio da Mancha de Areia para medir a textura.

De seguida é feita a descrição do material ensaiado, acompanhada por uma breve introdução teórica acerca dos ensaios e por fim, a análise aos resultados obtidos.

4.4.2 Descrição do material

A Figura 4.15 contém as três diferentes amostras de borracha a ensaiar, sendo cada uma delas proveniente de uma manta contínua, o bioROLLMAT, com diferentes coeficientes de atrito, textura e espessura.

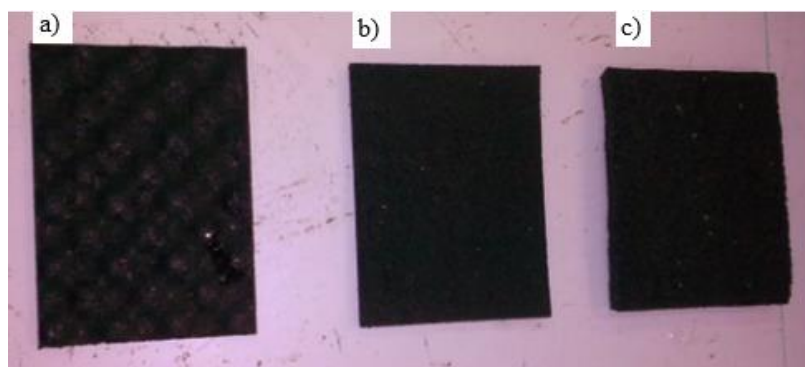


Figura 4.15 – Provetes laboratoriais: a) amostra 1; b) amostra 2; c) amostra 3.

De forma a facilitar a sua nomenclatura, distinguiu-se cada amostra pela sua espessura, já que duas delas possuíam profundidade de textura praticamente impercetível à vista desarmada (Figuras 4.15 b) e c)), diferenciando-se apenas a amostra 1, com maior profundidade de textura. As amostras 1, 2 e 3 têm espessuras de 4 mm, 4,2 mm e 10 mm, respetivamente.

4.4.3 Ensaio com o Pêndulo Britânico

Pretendeu-se com a realização deste ensaio medir a resistência à derrapagem da superfície das três amostras de borracha, à luz da mais recente Norma Europeia 13036-4 (2011). A grandeza

obtida com este ensaio é o valor *PTV* o qual fornece um valor padrão da resistência à derrapagem. O valor de *PTV* a obter deverá estar compreendido entre 0,45, para estradas em geral, e 0,65, para zonas particulares como rotundas, trechos de forte inclinação e aproximação a semáforos. Em Portugal, o valor de referência estabelecido no caderno de encargos da empresa Estradas de Portugal é de 0,55 (EP, 2009).

O Pêndulo Britânico (Figura 4.16) é um equipamento portátil equipado com um patim de borracha normalizada que se encontra montado na extremidade de um braço do pêndulo. O procedimento do ensaio consiste em libertar o braço do pêndulo da posição horizontal, existindo uma perda de energia no momento em que o patim desliza sobre a superfície de ensaio, a amostra de borracha. Essa perda é medida numa escala calibrada e é proporcional às características de rugosidade dessa superfície. As características do pêndulo permitem que este simule o desempenho de um veículo a travar numa superfície de pavimento molhado, circulando à velocidade de 50 km/h.



Figura 4.16 – Pêndulo Britânico do Laboratório de Pavimentos Rodoviários.

O aparelho foi colocado numa superfície firme com o pêndulo a oscilar na direção do tráfego, procedendo-se de seguida ao seu nivelamento, através da bolha de nível, e à sua calibração para o valor zero. Quanto às amostras, estas foram previamente escovadas e limpas com jato de água para eliminação de eventuais sujidades. Tratando-se de amostras de pequenas dimensões foi necessário fixá-las rigidamente a um tabuleiro de forma a evitar que estas se movessem durante a passagem do patim tendo-se ajustado para cada amostra, o comprimento da zona de contacto com o patim.

Antes de se iniciar o ensaio, tanto a superfície da amostra como o deslizador de borracha foram abundantemente humedecidos. Para cada ensaio foram registadas cinco leituras, sendo apenas registados os valores em que estes não diferiam em mais que três unidades *PTV*. O coeficiente de atrito da amostra corresponde à média das cinco leituras. Tendo sido utilizado o patim 57,

foi medida a temperatura da água, pois caso fosse diferente de 20 °C, era necessário proceder à correção da média obtida, de acordo com o Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Correção do *PTV* nos casos em que o ensaio é efetuado a temperaturas diferentes de 20°C quando é utilizado o patim 57.

| Temperatura medida (°C) | Correção para o valor medido |
|-------------------------|------------------------------|
| 36 a 40 | +3 |
| 30 a 35 | +2 |
| 23 a 29 | +1 |
| 19 a 22 | 0 |
| 16 a 18 | -1 |
| 11 a 15 | - 2 |
| 8 a 10 | -3 |
| 5 a 7 | -4 |

Os resultados dos ensaios com o Pendulo Britânico podem ser consultados no Anexo C. No Quadro 4.3 encontram-se os registos dos resultados finais dos ensaios.

Quadro 4.3 – Resultados dos ensaios do Pêndulo Britânico.

| Amostra | <i>PTV</i> | Temperatura (°C) | <i>PTV</i> _{Corrigido} |
|-----------|------------|------------------|---------------------------------|
| Amostra 1 | 0,45 | | 0,46 |
| Amostra 2 | 0,48 | 24 | 0,49 |
| Amostra 3 | 0,36 | | 0,37 |

4.4.4 Ensaio da Mancha de Areia

O objetivo da realização deste ensaio foi avaliar a textura superficial da borracha, uma vez que esta é uma característica importante no que respeita à resistência ao deslizamento e à produção de ruído.

Nos pavimentos, existem diferentes domínios de textura que são distinguidos segundo o seu comprimento de onda. Contudo, o ensaio da mancha de areia é usualmente utilizado para determinar a profundidade média da macrotextura da superfície pretendida. Considera-se que a macrotextura de uma superfície são os desvios entre a superfície de um pavimento e uma superfície plana de referência correspondendo a comprimentos de onda entre os 0.5 mm e os 50 mm.

O ensaio foi realizado segundo a Norma Europeia EN 13036-1 (2001) e consiste no espalhamento em forma circular de um volume conhecido de material sobre a superfície a estudar. A profundidade média das depressões da superfície do material é determinada em função do diâmetro do círculo obtido.

O material necessário à realização do ensaio foi o seguinte: recipiente com determinado volume de areia, disco circular com superfície de espalhamento em borracha dura com suporte vertical para manuseamento e uma régua para medir o diâmetro do círculo.

Antes da execução do ensaio, cada uma das amostras foi devidamente limpa de forma a remover eventuais resíduos. Encheu-se o cubo de areia e despejou-se sobre o centro da amostra, de tal forma que toda a areia contida formasse uma espécie de cone. Com o disco espalhou-se a areia, sempre em movimentos circulares, procurando-se obter uma superfície aproximadamente circular e de modo a que a areia preenchesse todas as depressões até não ser possível espalhar mais areia pela amostra.

Obtida a superfície de espalhamento, mediu-se o diâmetro do círculo obtido em 4 locais igualmente espaçados entre si, com a aproximação de 1 mm. Como as amostras eram demasiado pequenas não foi possível realizar os ensaios em cinco pontos diferentes, pelo que o resultado se baseia apenas no valor de um único ensaio.

Após a medição dos diâmetros obtidos, calculou-se a profundidade média de material espalhado utilizando para tal a Equação (6).

$$PMT = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (6)$$

Onde PMT é a profundidade média da textura superficial em mm, V é o volume do material espalhado em mm^3 e D é diâmetro médio do círculo obtido com o espalhamento do material em mm.

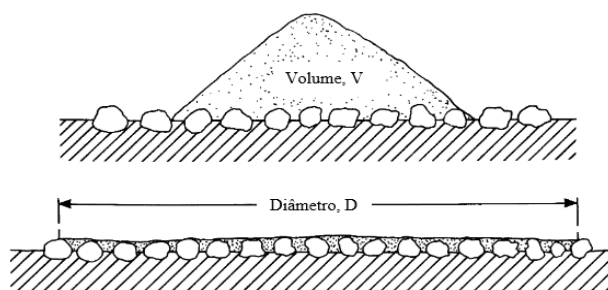


Figura 4.17 – Ensaio da Mancha de Areia.

Os resultados dos ensaios da Mancha de Areia podem ser consultados no Anexo D. No Quadro 4.4 encontra-se o registo dos resultados dos ensaios.

Quadro 4.4 – Resultados dos ensaios da Mancha de Areia.

| Amostra | <i>PMT</i> (mm) |
|-----------|-----------------|
| Amostra 1 | 2,56 |
| Amostra 2 | 0,56 |
| Amostra 3 | 0,50 |

4.4.5 Análise dos resultados obtidos

Realizados os ensaios em laboratório e feita a recolha dos resultados para o ensaio com o Pêndulo Britânico e para o ensaio da Mancha de Areia, pretende-se nesta subsecção fazer uma análise crítica aos mesmos.

Da análise ao Quadro 4.3, são várias as conclusões que podem ser feitas. Das três amostras cedidas, aquela que revelou melhor comportamento à derrapagem foi a amostra 2 com 0,49 *PTV*. Tendo as amostras 2 e 3 texturas e atritos muito semelhantes à vista desarmada, era expectável que os valores obtidos do ensaio destas amostras fossem similares, contudo tal não se verificou, tendo sido a amostra 3 a que revelou ter menor coeficiente de atrito (0,37), com uma diferença bastante significativa, quando comparada com a amostra 2.

Apesar dos resultados obtidos nos três ensaios estarem abaixo do valor de referência para o coeficiente de atrito indicado em caderno de encargos da EP (0,55), os resultados das amostras 1 e 2, tendo apresentado valores ligeiramente superiores aos mínimos estipulados para estradas em geral (0,45), como é o caso de estradas municipais, sugerem que estes tipos de borracha poderão vir a ser utilizados no revestimento do sistema da *Waydip*. No entanto, caso o sistema venha a ser implementado nas entradas de rotundas ou aproximação de semáforos, como é o caso do sistema piloto da Covilhã, nenhuma das borrachas testadas servirá, pois nesses locais o valor mínimo estipulado é de 0,65.

Para um estudo mais aprofundado e realista, o ideal seria refazer os ensaios para amostras à escala real em laboratório e posteriormente, no próprio pavimento já em serviço, para se poder avaliar também a degradação do coeficiente de atrito da borracha adotada, tanto a curto como a longo prazo. Nesse caso, deveriam ser feitos esforços para que os ensaios fossem realizados sempre na mesma altura do ano, de forma a ser minorizada a influência da sazonalidade que afeta o coeficiente de atrito, devido às diferentes condições climáticas fazerem variar as características superficiais e o desempenho dos próprios pneus que ficam em contacto com a superfície em questão.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio da Mancha de Areia para caracterização da textura das várias amostras, conclui-se que é a amostra 1 a que apresenta indubitavelmente maior profundidade de textura (2,56 mm), valor que não foi de forma alguma surpreendente, já que observando a amostra a olho nu era claramente perceptível, tendo sido até medida com uma régua, cujos valores revelaram ser bastante próximos.

Regra geral, a materiais com maior atrito correspondem materiais com maior textura. Tal não se verificou, pois à amostra 2 que tem maior coeficiente de atrito não correspondeu a maior profundidade de textura. Todavia, a diferença de ambas no que respeita ao coeficiente de atrito é bastante pequena.

Da medição da textura das amostras 2 e 3 resultaram medições de 0,56 mm e 0,50 mm respetivamente, e portanto inferiores a 1,0 mm que é o valor mínimo estipulado no caderno de encargos da empresa Estradas de Portugal (EP, 2009). Também estes valores foram de encontro ao expectável, já que ambas as amostras aparentavam ser bastante lisas quando observadas a olho nu.

Apesar do ensaio da Mancha de Areia não fornecer uma indicação direta do atrito pneu-pavimento, constituindo apenas uma medida da macrotextura, o ensaio traduz igualmente um bom indicador do potencial do material, principalmente em estradas transitáveis a velocidades elevadas.

Finalmente, atendendo aos valores mínimos necessários tanto para o coeficiente de atrito como para a textura, conclui-se que, das três borrachas ensaiadas, apenas a borracha 1 pode vir a servir de revestimento para o sistema, ainda que condicionada à escolha do local da sua implementação.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O aproveitamento da energia elétrica gerada pelos veículos, através de sistemas instalados nos próprios pavimentos, afigura-se como uma possível solução alternativa aos meios convencionais de produção de energia a partir de fontes renováveis. Apesar dos potenciais benefícios destes sistemas, existe ainda um longo caminho a percorrer para que seja alcançado um equilíbrio entre a maximização da produção de energia e as funções estruturais e funcionais que as várias componentes destes sistemas devem assegurar.

A principal preocupação no desenvolvimento das referidas tecnologias é sem dúvida ao nível do modo de funcionamento, sendo raras as referências aos materiais e respetivas características que estarão em contacto direto com o pneu dos veículos. A revisão bibliográfica efetuada sobre a geração de energia nos pavimentos rodoviários revelou serem ainda escassos os trabalhos de investigação que avaliem de que forma estes sistemas podem afetar a capacidade estrutural dos pavimentos sem comprometer a segurança rodoviária. Neste sentido, a presente dissertação elegeu como objetivo principal o estudo do material mais adequado para o revestimento de cada módulo do sistema *Waynergy Vehicles* da *Waydip*, tendo sido feito para tal um estudo pormenorizado dos materiais e respetivas propriedades e enquadramento legal.

Apesar dos objetivos inicialmente propostos terem sofrido algumas alterações devido à falta de tempo e de material, considera-se que o trabalho foi desenvolvido com sucesso e que o mesmo constitui um ponto de partida para trabalhos futuros.

Em termos metodológicos, optou-se por avaliar a adequabilidade do material segundo dois processos distintos: (i) validação do comportamento mecânico do material perante várias simulações, através da modelação realizada em Excel; e (ii) validação do comportamento superficial do material por intermédio de ensaios padronizados para a determinação do coeficiente de atrito e da textura.

Numa primeira fase, o estudo incidiu na análise quer das soluções já testadas no sistema piloto como a tinta branca da Sociedade Nacional de Sinalização Vertical, as LRV em borracha e em madeira e a mistura de aglomerados da 3M, quer de outras potencialmente interessantes, como

a simulação do atrito e da textura na própria placa de alumínio ou a aplicação do revestimento antiderrapante. Do estudo concluiu-se que as alternativas abordadas não eram solução para o revestimento dos módulos, à exceção do revestimento antiderrapante que revelou excelentes propriedades funcionais, ainda que a sua validação careça da realização de testes experimentais.

Tendo em conta a configuração do novo sistema em desenvolvimento, concluiu-se, com o auxílio dos resultados da modelação, que o material mais adequado para revestir os módulos do sistema será a borracha, e que quanto maior for o módulo de elasticidade da mesma, menor será a energia dissipada no material. Observou-se igualmente que o comprimento ideal das sub-superfícies estudadas para aumentar o rendimento do sistema, por módulo, é de 20 cm. A modelação permitiu ainda concluir que tanto o peso do veículo como o deslocamento vertical da superfície do sistema, também influenciam a energia captada e a absorvida pela borracha, tendo por base pesos crescentes e deslocamentos de 15 mm.

De acordo com as velocidades simuladas, foi possível concluir que o domínio privilegiado de aplicação do *Waynergy Vehicles* será em locais com velocidades reduzidas de circulação, como zonas de cedência de passagem, entradas de rotundas, portagens, zonas imediatamente antecedentes a LRV e atravessamentos pedonais e nas “Zonas 30”.

Numa segunda fase, os objetivos foram centrados no estudo experimental das três diferentes amostras de borracha fornecidas para aferir as suas características funcionais, realizando para tal os ensaios com o Pêndulo Britânico e da Mancha de Areia. Conjugando os resultados obtidos de ambos os ensaios, concluiu-se que apenas a amostra 1 revelou ter características suscetíveis de contribuir eficazmente para a segurança e comodidade dos utentes, sendo portanto uma opção para o revestimento do sistema.

Finalmente, tratando-se de um sistema onde se aproveita a energia desperdiçada pelo movimento dos veículos para gerar energia elétrica e que integra material reciclado num dos seus componentes, o *Waynergy Vehicles* poderá vir a ser um contributo para o desenvolvimento sustentável, nas suas principais vertentes ambiental e económica.

5.2 Trabalhos Futuros

O presente estudo de investigação constitui mais uma etapa num projeto de investigação mais alargado, deixando em aberto estudos que devem vir a ser realizados futuramente.

Uma vez encontrado o material mais adequado para a componente em estudo, ou seja, o revestimento, será pertinente o desenvolvimento de uma nova modelação que contemple outras

formas para a superfície diferentes da forma plana utilizada no âmbito da presente dissertação. Essa modelação poderá ainda ser extensiva a veículos com três ou mais eixos.

Encontrada a forma ótima e conjugando-a com a dimensão ótima, já estudada, é importante que seja desenvolvido um protótipo do revestimento, ou mais, no caso de surgirem novas borrachas que ofereçam igualmente bons desempenhos a nível de atrito e textura. Esse protótipo deve ser testado tanto isoladamente como posteriormente integrado com o sistema de geração de energia elétrica no pavimento rodoviário, procedendo-se à recolha dos dados experimentais e, claro está, à sua análise e tratamento.

É igualmente pertinente realizar um estudo para avaliar de que forma a introdução do sistema *Waynergy Vehicles* interfere na capacidade estrutural do restante pavimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1997). “Highway Safety Design and Operations Guide”. American Associations of State Highway and Transportation Officials, Washinton, United States of America, 1-118.
- Branco, F., Pereira, P. e Picado-Santos, L. (2011). “Pavimentos Rodoviários”. Edições Almedina, Coimbra, 1-388.
- BS EN 1463 – 1 (2009). “Road Marking Materials – Retroreflecting Road Studs”. British Standard.
- CEPSA (2006). “Manual de Pavimentação”. CEPSA Betumes. Barcelona, Espanha, 1-157.
- Chemtec@ (2008).”Ficha Técnica 266 – TEC TRAF HD”. http://chemtec.pt/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=882&category_id=8&manufacturer_id=39&option=com_virtuemart&Itemid=127. Acesso em abril de 2014.
- Chemtec@ (2011).”Ficha Técnica 306 – TEC TRAF HD”. http://chemtec.pt/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=863&category_id=10&manufacturer_id=39&option=com_virtuemart&Itemid=127. Acesso em abril de 2014.
- CONIEX@ (2005). “Abrasivos e Granalhas”. Catálogo 082, Edição10.02.05. http://www.coniex.pt/catalogos/catalogo_granalhagem_abrasivos_granalhas_rev1_pt_coniex.pdf. Acedido em abril de 2014.
- Cravo, L. (2014). “Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 1-75.
- Decreto Regulamentar nº22-A/98 (1998). “Regulamento de Sinalização do Trânsito”. Diário da República, I Série B, nº 227, 1 de outubro.
- DGV (2004). “Nota Técnica - Instalação e Sinalização de Lombas Redutoras de velocidade”. Despacho nº109/2004, Direção dos Serviços de Trânsito, 1-18.
- Duarte, F. e Casimiro, F. (2011). “Pavimento sustentável para geração de energia elétrica a partir do movimento de pessoas e veículos”. Instituto Nacional a Propriedade Industrial, PT 105126.
- Duarte, F., Casimiro, F., Correia, D., Mendes, R. e Ferreira, A. (2013). “Waynergy People: a new pavement energy harvest system”. Municipal Engineer, Institution of Civil Engineers, 166 (4), 250-256.
- Ecoprodev@ (2014). <http://www.ecoprodev.pt>. Ficha Técnica, LRV – Lomba Redutora de Velocidade em Borracha Reciclada. Acesso em março de 2014.
- EngenhariaCivil.com@ (2014). <http://www.engenhariacivil.com/pavimento-fotovoltaico-passeios>. EngenhariaCivil.com – Engenharia Civil na Internet. Acesso em março de 2014.

- EN 1436 (2007). “Road Marking Materials – Road Marking Performance for Road Users”. CEN, European Committee for Standardization.
- EN 13036-1 (2003). “Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai - Partie 1: Mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache”. CEN, European Committee for Standardization.
- EP (2009). “Características dos Materiais. Caderno de Encargos Tipo Obra”. Estradas de Portugal, S.A., 2-23.
- EP (2009). “Pavimentação – Características dos Materiais, Caderno de Encargo Tipo Obra”. Estradas de Portugal, S.A., 1-120.
- Ferreira, P (2007). “ A Granalhagem como Técnica Inovadora e Eficaz para a Melhoria das Condições de Aderência de um Pavimento Rodoviário”. VI Jornadas Luso-Brasileiras – Inovação e Novos Desafios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ferreira, A. (2012), “Briefing: Recent developments in pavement energy harvest systems”, Municipal Engineer (ISI Journal), Institution of Civil Engineers, 165 (4), 189-192.
- FilipeCasimiro@ (2014). <http://www.filipecasimiro.com/projetos-3/pizo/>. Filipe Casimiro, Página Pessoal. Pizo, o pavimento piezoelétrico. Acesso em abril de 2014.
- Hasebel, M., Kamikawa, Y., Meiarashi, S., (2006), “Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement”, 25th International Conference on Thermoelectrics (ICT), Vienna, Austria.
- IMTT (2011). “Coleção de Brochuras Técnicas/Temáticas, Acalmia de Tráfego”. Instituto de Mobilidade e dos Transportes Terrestres, 1-47.
- INIR (2011). “Medidas de Acalmia de Tráfego”. Disposições Normativas, Volume 1, Medidas Individuais Aplicadas em Atravessamentos de Localidades. Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, 1-87.
- Innowattechh@ (2014). <http://www.innowattech.co.il/techInfo.aspx>. Innowattech – Energy Harvesting Systems, Israel. Acesso em março de 2014.
- INOKEM@ (2009). “Ficha Técnica – Tinta Acrílica de Marcação de Estradas”. <http://www.inokem.com/ficheiros/uploads/c0a4ff9d235d87102a942fdf16c9c242.pdf>. Acesso em abril de 2014.
- JAE (1995). “Norma de Marcas Rodoviárias”. Junta Autónoma de Estradas (atual EP), Lisboa, Portugal, 1-139.
- JAE (1998). “Caderno de Encargos: 03-pavimentação”. Junta Autónoma de Estradas (atual EP), Almada, 1-83.
- Kinergy Power@ (2014). <http://www.kinergypower.com/index.shtml>. Kinergy Power – Energy Carpet, USA. Acesso em março de 2014.
- Lima, J. e Brito, J. (2009). “Classificação das juntas de dilatação em obras de arte rodoviárias Portuguesas”. Teoria e Prática na Engenharia Civil, 14, 31-41.
- Luso Granalhagem@ (2014). <http://www.lusogranalhagem.pt/Maquinas.html>. Acesso em abril de 2014.
- Manutan@ (2014). <http://www.manutan.pt/>. Equipamento Geral dos Espaços Colectivos. Acesso em março de 2014.

- Maré F. (2011). “História das Infraestruturas Rodoviárias”. Faculdade de Engenharia do Porto, 1-166.
- MAURER (2006). “Expansion Joints with Hybrid-Edge Profile Type SW” Catálogo da Maurer Söhne Group.
- Menezes, M. (2008). “Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para Análise da Segurança do Tráfego”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1-84.
- Neosfalto@ (2014). “Ficha Técnica – Colorpav”. <http://www.neosfalto.com/index.php?id=27>. Acesso em março de 2014.
- NP EN 1423 (2008). “Materiais para marcação rodoviária. Materiais de projecção. Microesferas de vidro, agregados antiderrapantes e mistura destes dois componentes”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 1424 (2008). “Materiais para marcação rodoviária. Micoesferas de vidro de pré mistura”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 1463-1 (2007). “Materiais para marcação rodoviária. Marcadores retrorreflectores. Parte 1: Requisitos de desempenho inicial”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 1463-2 (2007). “Materiais para marcação rodoviária. Marcadores retrorreflectores. Parte 2: Especificações para o ensaio de campo”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 1790 (2006). “Materiais para marcação rodoviária. Marcas rodoviárias prefabricadas”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 1871 (2008). “Materiais para marcação rodoviária. Propriedades físicas”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 12591 (2011). “Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- NP EN 13036-4 (2011).” Caraterísticas superficiais de pavimentos de estradas e de aeroportos - Métodos de ensaio - Parte 4: Método para medição da resistência à derrapagem da superfície do pavimento - Ensaio com o Pêndulo Britânico”. Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal.
- ONU (1995). “Convention on Road Signs and Signals – Amendment 1”. Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, 1-61.
- Pascual, P., Vega, A., Rodríguez Bayón, J., Rodríguez Hernández, J., Castro, D., Serrano, P., Cortés, C., García, C., Álvarez, S., Potti, J.J. (2008) "Pavimentos Asfálticos Aostenibles(PAS)". VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid, 21-23 de Octubre de 2008.
- Pavegen@ (2014). <http://pavegen.com/technology>. Pevegen Systems – Generating energy from footsteps. London, England. Acesso em março de 2014.
- PaveGuard@ (2014). <http://www.paveguardtech.com/solutions/paveguardsolutions.html>. Pave Guard Technologies, Inc, USA. Acesso em março de 2014.
- Ramberger, G. (2002). “Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges”. International Association for Bridge and Structural Engineering, 1-88.

- Rodrigues, M, Roque, C., Macedo, J. (2008). “Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes – Sinalização Rodoviária”. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, 1-70.
- ROADPAINT@ (2013). “Catálogo de Produtos”. Roadpaint – produtos termoplásticos. Portugal.
- Roque, C. (2005). “Marcação Rodoviária”. 1-46.
- RRL (1969), “Rode Note 27 – Instructions for using the portable skid resistance tester”, Road Research Laboratory, London.
- SAFETYXPRESSSTROMBERG@ (2014). <http://www.roadquip.co.za/home>. RoadQuip – Road Safety Equipment. Acesso em março de 2014.
- Seco, A., Ribeiro, A., Macedo, J. e Bastos Silva, A. (2008). “Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes – Acalmia de Tráfego”. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, 1-49.
- Sinasc@ (2014). <http://www.sinasc.com.br/produtos/dispositivos-auxiliares/>. Acesso em abril de 2014.
- Sintimex@ (2014). <http://www.sintimex.pt/>. Ficha Técnica, Lomba Redutora de Velocidade. Acesso em março de 2014.
- Solar Roadways@ (2014). <http://www.solarroadways.com/main.html>. Solar Roadways, USA. Acesso em março de 2014.
- Steen, M. e C. Hageback (1999). “Buses & Bumps”. Vagverket, Swedish National Road Administration. Borlange, Sweden.
- The Highways Agency (1994). “Design Manual for roads and bridges. Part 6 BD 33/94 Vol.2, Section 3. Materials and componentes”. Her Majesty’s Stationery Office, 1-18.
- Trafficcalming@ (2014). <http://www.trafficcalming.org>. Acesso em março de 2014.
- Van Bijsterveld, W., Houben, L., Scarpas, A. e Molenaar, A. (2001). “Using Pavement as Solar Collector. Effect on pavement temperature and structural response”. Transportation Research Record, 1778 (17): 140-148.
- Wang, H., Wu, S., Chen, M. e Zhang, Y. (2010). “Numerical Simulation on the Thermal response of heat-conduction asphalt pavements”. Physica Scripta, T139.
- Washington State Department of Transportation (2014). “Bridge Design Manual LRFD – Chapter 9 Bearings & Expansion Joints”. Engineering and Regional Operations, 1-1362.
- Waydip@ (2014). http://www.waydip.com/waynergy_vehicles.php. Waydip – Energia e Ambiente Lda, Portugal. Último acesso setembro de 2014.
- Wu, G. e Yu, X. (2011) “Thermal Energy Harvesting Across Pavement Structure”, Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA. Acesso em março de 2014.
- Xiong, H., Wang, L., Wang, D., Druta, C., (2012). “Piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements”. International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 5, Issue 5, pp. 333-337.

ANEXO A

Quadro A.1 – Características das tintas implementadas em marcação rodoviária (Fichas Técnicas).

| | Tinta acrílica de um componente | Tinta acrílica a dois componentes | Tinta termoplástica |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------|
| Peso específico (g/cm ³) | 1,45-1,60 | 1,85-2,25 | 1,85-2,25 |
| Viscosidade (Pa.s) | 7-10 | 9,5 – 10,5 | 7-10 |
| Resistência à derrapagem (PTV) | > 45 ou 50 em zonas pontualmente perigosas | | |
| Durabilidade (nº de passagens) | 500 000 | | |
| Resistência aos UV | Ótima | | |
| Resistência ao abatimento (%) | <10 | | |
| Resistência aos UV | Ótima | | |

Quadro A.2 – Propriedades físicas e mecânicas de cada tipo de lombas (Fichas Técnicas).

| | Lomba em borracha natural | Lomba em borracha natural vulcanizada | Lomba em borracha reciclada |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Densidade (g/cm ³) | 1,25 | 1,46 | 1,4 |
| Dureza (Shore A) | 76 | 76 | 85 |
| Resistência à tração (MPa) | 5,1 | 10 | 6 |
| Alongamento na rotura (%) | 125 | 200 | 200 |
| Temperatura mínima de serviço (°C) | -55 | -55 | -55 |
| Temperatura máxima de serviço (°C) | 55 | 55 | 55 |

ANEXO B

Quadro B.1 – Propriedades físicas, químicas e tribológicas.

| | Borracha Natural | SBR | PU | IR | BR | CR |
|---|------------------|------------------|----------------|------------------|-------------|-------------|
| Densidade (g/cm ³) | 0,93 | 0,92 a 0,99 | 1,05 | 0,91 a 0,93 | 0,91 a 0,93 | 1,23 a 1,24 |
| Dureza (Shore A) | 25 | 30 a 95 | 40 a 100 | 15 a 100 | 40 a 95 | 20 a 95 |
| Tensão de rotura (MPa) | 30 | 7 a 21 | 7 a 70 | 15 a 25 | 3,5 a 21 | 7 a 21 |
| Alongamento na rotura (%) | 500 | 600 | 200 a 600 | 1000 | 600 | 600 |
| Resiliência | Excelente | Boa | Moderada a boa | Excelente | Excelente | Boa |
| Resistência ao rasgão | Boa | Excelente | Moderada a boa | Excelente | Excelente | Boa |
| Resistência ao impacto | Boa | Excelente | Excelente | Excelente | Excelente | Boa |
| Deformação residual (%) | 15 | 10 a 30 | Moderada a boa | 10 a 30 | 10 a 30 | 10 a 30 |
| Resistência à abrasão | Excelente | | | | | |
| Temperatura mínima de serviço (°C) | -55 | -45 | -35 | -50 | -60 | -45 |
| Temperatura máxima de serviço (°C) | 90 | 85 | 80 | 80 | 90 | 100 |
| Temperatura máxima por períodos curtos | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 120 |
| Vida média (anos) | - | 3 a 5 | 5 e 5 a 10 | 2 a 5 | 3 a 5 | 5 a 15 |
| Resistência ao ozono | Muito fraca | Moderada | Excelente | Fraca | Moderada | Boa |
| Resistência à intempérie, luz solar e UV | Moderada | Boa | Moderada a boa | Fraca | Moderada | Boa |
| Resistência à água | - | Boa | Moderada a boa | Boa | Boa | Boa |
| Resistência a ácidos e bases diluídas | Fraca | Boa | Fraca | Boa | Boa | Boa |
| Resistência a ácidos e bases concentradas | Fraca | Fraca a moderada | Muito fraca | Fraca a moderada | Fraca | Muito fraca |
| Resistência a óleos e gasolinas | Muito fraca | Muito fraca | Boa | Muito fraca | Muito fraca | Boa |
| Coefficiente de Poisson | 0,45 a 0,50 | | | | | |

ANEXO C

Laboratório: Laboratório de Pavimentos Rodoviários

Morada: Departamento de Engenharia Civil

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade de Coimbra

3030-788 Coimbra Portugal

| | |
|--|------------|
| Determinação do Valor do Ensaio do Pêndulo (PTV) | EN 13036-4 |
|--|------------|

Folha de

Pêndulo
Nr.: 1

Amostra N.º.: 1

| | | | | | |
|------------------|-----------------|------------------------------|---------|-------------------|-------|
| Patim utilizado: | Largo (76,2 mm) | Comprimento de deslizamento: | 26±1 mm | Tipo de patim: 57 | [CEN] |
|------------------|-----------------|------------------------------|---------|-------------------|-------|

Superfície: Plana

Data:
22/09/2014

Local de ensaio: Laboratório de Pavimentos Rodoviários

Hora: 12h 30 min

| | | | | | | | | |
|------------|------|--|----|----|-------|---------------|-------|------|
| Amostra 1 | | Descrição: amostra com espessura de 4 mm | | | | | | |
| Oscilações | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 45 | 46 | 46 | 45 | 45 | - | - | - |
| PTV: | 0,45 | Temperatura | | | 24 °C | PTV corrigido | médio | 0,46 |

| | | | | | | | | |
|------------|------|--|----|----|-------|---------------|-------|------|
| Amostra 2 | | Descrição: amostra com espessura de 4.2 mm | | | | | | |
| Oscilações | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 48 | 47 | 49 | 48 | 50 | - | - | - |
| PTV: | 0,48 | Temperatura | | | 24 °C | PTV corrigido | médio | 0,49 |

| | | | | | | | | |
|------------|------|---|----|----|-------|---------------|-------|------|
| Amostra 3 | | Descrição: amostra com espessura de 10 mm | | | | | | |
| Oscilações | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 37 | 36 | 36 | 36 | 35 | - | - | - |
| PTV: | 0,36 | Temperatura | | | 24 °C | PTV corrigido | médio | 0,37 |

Orientação do ensaio: Paralelo ao tráfego

Tipo de superfície: Borracha

Ensaio realizado por: Vanessa Santos

Data: 22/09/2014

ANEXO D

Laboratório: Laboratório de Pavimentos Rodoviários

Morada: Departamento de Engenharia Civil
 Faculdade de Ciências e Tecnologia
 Universidade de Coimbra
 Rua Luís Reis Santos - Pólo II
 3030-788 Coimbra Portugal

| | |
|--|------------|
| Determinação da profundidade média da macrotextura | EN 13036-1 |
|--|------------|

Local de ensaio: Laboratório
 de Pavimentos Rodoviários

Data:
 22/09/2014
 Hora: 15h 00 min

| | | | | |
|---------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Amostra 1 | Descrição: amostra com espessura de 4 mm | | | |
| Volume (mm ³): 6180 | D ₁ = 51 mm | D ₂ = 60 mm | D ₃ = 65 mm | D ₄ = 50 mm |
| | Média: 56,5 PMT: 2,46 | | | |

| | | | | |
|---------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Amostra 2 | Descrição: amostra com espessura de 4,2 mm | | | |
| Volume (mm ³): 3100 | D ₁ = 85 mm | D ₂ = 90 mm | D ₃ = 80 mm | D ₄ = 82 mm |
| | Média: 84,3 PMT: 0,56 | | | |

| | | | | |
|---------------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| Amostra 3 | Descrição: amostra com espessura de 10 mm | | | |
| Volume (mm ³): 3100 | D ₁ = 93 mm | D ₂ = 80 mm | D ₃ = 92 mm | D ₄ = 90 mm |
| | Média: 88,8 PMT: 0,5 | | | |

Ensaio realizado por: Vanessa Santos

Data: 22/09/2014