

## DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO E DA DESAGREGAÇÃO DEVIDO À RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

### **J. P. ARAÚJO**

Aluno de doutoramento  
CTAC – Universidade do Minho  
Guimarães; Portugal  
jparaujo.civil@gmail.com

### **C. PALHA**

Técnico superior  
CTAC – Universidade do Minho  
Guimarães; Portugal  
cpalha@civil.uminho.pt

### **H. SILVA**

Professor Auxiliar  
CTAC – Universidade do Minho  
Guimarães; Portugal  
hugo@civil.uminho.pt

### **J. OLIVEIRA**

Professor Auxiliar  
CTAC – Universidade do Minho  
Guimarães; Portugal  
joliveira@civil.uminho.pt

### **L. COSTA**

Aluna de doutoramento  
CTAC – Universidade do Minho  
Guimarães; Portugal  
b6100@civil.uminho.pt

## **RESUMO**

Atendendo a que as características estruturais e superficiais dos pavimentos rodoviários influenciam o consumo de combustível dos veículos, foi desenvolvido um equipamento que pretende determinar as diferenças de consumo de energia imputáveis à circulação em pavimentos com diferentes características superficiais, de forma a avaliar soluções mais sustentáveis que permitam reduzir os custos para os utentes devido ao consumo de combustível. Para além disso, o equipamento permitirá ainda avaliar a resistência à desagregação. Neste sentido, este equipamento apoiará a seleção de misturas betuminosas ou de processos construtivos, demonstrando os resultados até agora obtidos que este tem grande potencial para ser utilizado numa forma mais generalizada, conseguindo ser sensível às alterações das características superficiais das misturas utilizadas nos pavimentos e que influenciam a resistência ao rolamento.

## **1. INTRODUÇÃO**

Os pavimentos rodoviários afiguram-se, no presente, como infraestruturas de grande importância para o desenvolvimento socioeconómico das regiões. Embora se valorize, naturalmente, a construção que implique menores custos, as preocupações ambientais estão cada vez mais presentes nas tomadas de decisão, procurando-se determinar todos os impactos (económicos, sociais e ambientais) que os pavimentos rodoviários apresentam a longo prazo.

Assim, à medida que aumenta a percepção de que os recursos naturais (minerais, combustíveis fósseis, entre muitos outros) não são inesgotáveis, intensifica-se a pesquisa de soluções que permitam reduzir a sua dependência. Por outro lado, também é uma preocupação cada vez maior para a Sociedade e para os governantes a redução de emissões gasosas com efeitos de estufa, havendo metas cada vez mais rigorosas a serem cumpridas relativamente a este aspeto. Exemplo disso são os objetivos traçados pela União Europeia e que preveem, até 2020, a redução de 20% dos gases com efeito de estufa (em relação aos níveis de 1990), a utilização de 20% de energia proveniente de fontes renováveis e uma melhoria de 20% na eficiência energética [1].

O ciclo de vida de um pavimento rodoviário está dividido em cinco fases: (1) extração de matérias-primas e produção; (2) construção; (3) utilização; (4) conservação; (5) fim-de-vida. Cada fase é composta por vários componentes, cada um representando uma interação única entre o pavimento e o meio ambiente [2].

Atualmente, as metodologias de Análise do Ciclo de Vida que têm sido propostas no domínio da construção e reabilitação rodoviária concentram-se demasiado nas fases de extração, produção, transporte e aplicação dos materiais (fases 1 e 2). No entanto, a construção e manutenção representam apenas cerca de 2% do consumo total de energia durante o ciclo de vida do pavimento, sendo os restantes 98% imputados à fase de utilização [3].

Tendo presentes alguns estudos que referem que os pavimentos mais rígidos e/ou menos rugosos obrigam a um menor consumo de combustível [4; 5], desenvolveu-se um equipamento com o qual se pretende determinar a influência de variáveis como a textura dos pavimentos na resistência ao rolamento e, por conseguinte, no consumo de combustível dos veículos.

Os resultados assim obtidos destinam-se a integrar uma Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida entretanto desenvolvida [6], a qual permite, para os pavimentos em estudo, quantificar e comparar o consumo de energia e as emissões de gases. Os gases considerados são CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, dando-se depois especial atenção ao CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O devido à sua contribuição para o efeito de estufa, procedendo-se, para cada alternativa, à determinação do potencial de aquecimento global (GWP), uma medida da contribuição para o aquecimento global dos gases com efeito de estufa produzidos [7].

Em resumo, sem desprezar as fases de obtenção dos materiais e construção da estrada, com este equipamento pretende-se dar especial atenção à fase de utilização dos pavimentos, centrando-se por isso na resistência ao rolamento e consequente variação do consumo de combustível dos veículos resultante da aplicação de diferentes misturas betuminosas para camadas de desgaste. Realça-se que uma pequena redução do consumo individual de cada veículo, ao ser acumulada pela passagem de milhões de veículos ao longo do ciclo de vida do pavimento, poderá ter um peso significativo na sustentabilidade da solução, quer pela redução do consumo de combustíveis fósseis e respetivos custos associados aos utentes, quer pela redução das emissões gasosas resultantes.

Para além disso, o equipamento permitirá ainda avaliar a resistência à desagregação, através da avaliação de alterações a nível das propriedades superficiais. A resistência à desagregação será avaliada através da medição das alterações volumétricas das misturas utilizadas na superfície do pavimento, e pela perda de massa final resultante da desagregação do material. Esta avaliação pode ter uma importância acrescida em zonas urbanas, onde se verifica a existência de condições muito severas (cruzamentos, rotundas, nós, parques de estacionamento, parques industriais) que podem facilitar a desagregação das camadas superficiais do pavimento. Neste sentido, pretende-se que este equipamento possa também constituir um apoio na seleção de misturas betuminosas ou de processos construtivos que aumentem a resistência à desagregação em condições de carga mais rigorosas.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Equipamento desenvolvido**

#### **2.1.1 Breve descrição**

Ao desenvolver o presente equipamento procurou-se que este possuísse dimensões relativamente reduzidas, fosse transportável de forma a permitir a realização de ensaios *in situ*, pudesse ser obtido a um custo relativamente baixo, e permitisse avaliar a resistência ao rolamento oferecida pela circulação sobre diferentes superfícies de pavimentos. De forma a assegurar a portabilidade do equipamento, optou-se pela sua construção em diversos módulos facilmente desmontáveis, sendo assim possível o seu transporte numa carrinha, sem obrigar ao recurso a outros meios, nomeadamente atrelados, permitindo ainda a sua fácil e rápida instalação no local.

De uma forma geral, este equipamento é constituído por um elemento central (veio), o qual garante a fixação ao pavimento, e 2 braços simétricos dotados de rodas nas extremidades exteriores. Uma das rodas (roda motriz) tem acoplado um motor, o qual garante o movimento circular do equipamento em torno do elemento central. Acoplado ao veio central está ainda um terceiro braço, perpendicular aos outros dois que suportam as rodas, dotado de um laser para avaliação da macrotextura do pavimento.

No topo do veio central existe um sistema de anéis deslizantes (“*slip rings*”, na nomenclatura Anglo-saxónica), o qual assegura o fornecimento de energia ao motor e a transmissão de dados entre este e o computador, localizado fora do

perímetro de rolagem do equipamento, sendo essa ligação estabelecida através de um pórtico concebido para o efeito, conforme se pode visualizar na Figura 1.

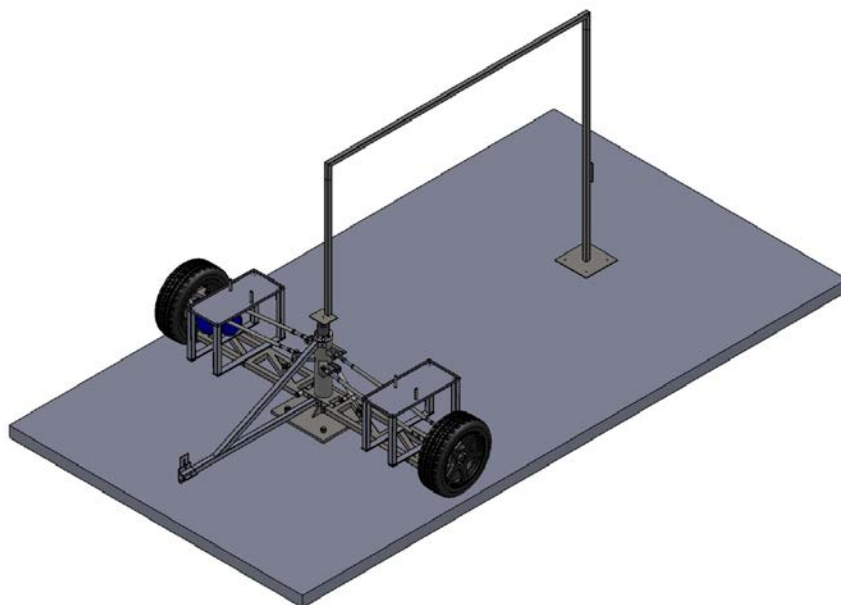


Figura 1: Equipamento desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento

#### 2.1.2 Características técnicas e geométricas

Conforme referido na secção anterior, a fixação do equipamento ao solo é garantida pelo veio central. Essa fixação é materializada por uma sapata metálica aparafusada ao pavimento através de 4 parafusos sextavados com rosca total com 16 milímetros de diâmetro (M16). O veio central (que permanece estático por estar fixo à sapata) está envolto por uma “camisa de rotação” a qual gira solidariamente com os braços e as rodas. Os braços são constituídos por módulos metálicos, os quais, juntamente com as diversas componentes de ligação apresentadas na Figura 2, perfazem um raio de 1,25 metros (entre o eixo de rotação e o centro das rodas).

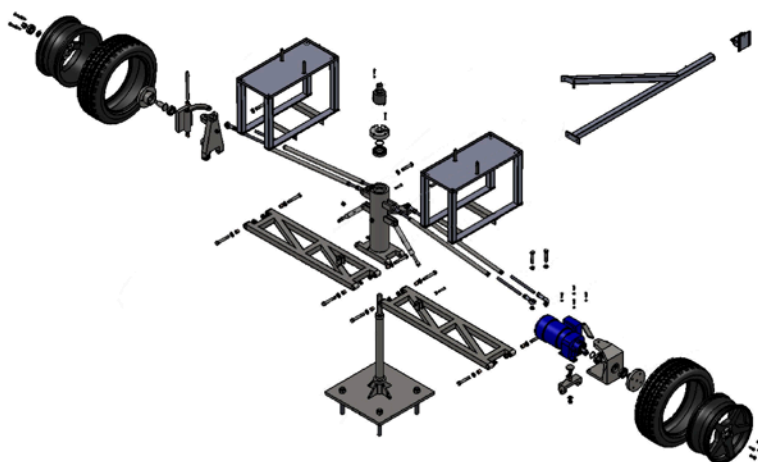


Figura 2: Componentes do equipamento desenvolvido

Os braços encontram-se ligados ao elemento central através de rótulas, de forma a garantir o contacto permanente entre as rodas e o pavimento e eliminar efeitos indesejados que poderiam ocorrer devido a desnivelamentos do pavimento. As rodas são direccionáveis, permitindo os braços superiores dotá-las de uma inclinação até 5° relativamente à trajetória normal, através do ajustamento de varões roscados. A velocidade é variável, podendo atingir um máximo de 20 km/h.

Optou-se pela colocação de duas rodas simétricas, e não apenas uma, de forma a eliminar a influência de eventuais inclinações do pavimento no esforço de torque registado durante os movimentos ascendente e descendente dessa roda. Além disso, o facto de existirem duas rodas simétricas permite equilibrar os esforços exercidos sobre o eixo central e “neutralizar” o efeito da aceleração centrífuga, o qual, caso existisse apenas uma roda, seria significativo, dado o raio de curvatura ser bastante pequeno. Optou-se ainda pela colocação do motor junto a uma das rodas, e não no veio central, de forma a evitar o efeito de variáveis que não estejam relacionadas com a circulação em si, minimizando o seu efeito no esforço de torque registado. Consequentemente, junto à roda não motriz, colocou-se um peso adicional de forma a equilibrar o equipamento, isto é, eliminar o efeito que o peso do motor poderia ter no esforço de torque registado em situações de diferentes sentidos de movimento (ascendente e descendente) da roda sujeita a uma maior carga, nas situações em que o pavimento possua inclinação.

Sobre os braços inferiores, junto a cada uma das rodas, colocou-se ainda uma base sobre a qual poderão ser colocados diferentes pesos, permitindo desta forma simular diferentes cargas a atuar sobre as rodas. Caso não sejam colocadas cargas adicionais, isto é, nos casos em que a carga a atuar sobre as rodas é apenas devida ao peso próprio do equipamento, o peso que cada roda suporta é de 700 N. Cada placa metálica que se coloque sobre o respetivo suporte provocará um aumento da carga sobre essa roda de 60 N.

Os pneus escolhidos, designados pela nomenclatura 195/50 R 15 82V, são pneus comuns, disponíveis no mercado e utilizados por diversos modelos de automóveis, bem como as jantes de 15 polegadas. Esta escolha foi feita com base num estudo de mercado, para que estes representassem o melhor possível a generalidade das características das rodas dos veículos que utilizam as nossas estradas.

A transmissão de dados e energia elétrica entre os cabos que giram solidários com as rodas e os braços, e os cabos superiores que permanecem estáticos (fixos ao pórtico), é assegurada, sem que estes se enrolem devido ao movimento circular contínuo do equipamento, por um sistema de anéis deslizantes.

As diferenças em termos de resistência ao rolamento que se pretendem estabelecer, basear-se-ão no esforço de torque e no consumo de energia. Relativamente à obtenção do esforço de torque, esta é realizada com recurso a uma das funções disponibilizadas pelo variador de frequência acoplado ao motor. O variador de frequência envia esses dados para o computador, os quais são monitorizados e guardados através de uma aplicação desenvolvida para o efeito em LabVIEW, o qual controla também o funcionamento do equipamento. Já a medição do consumo de energia é efetuada com recurso a um multímetro e uma placa de aquisição de dados. Antes de ser fornecida ao motor do equipamento, a energia passa pelo multímetro, o qual mede a sua tensão e intensidade, enviando esses dados para a placa de aquisição que por sua vez os transmite ao computador, sendo também armazenados através de uma aplicação em LabVIEW.

## **2.2 Ensaios experimentais**

### **2.2.1 Procedimentos de ensaio**

Após o início do movimento dos veículos, a temperatura dos pneus vai aumentando, acabando depois por estabilizar. À medida que a temperatura dos pneus vai aumentando, verifica-se uma tendência inversa na resistência ao rolamento, isto é, esta vai diminuindo. Embora a estabilização da temperatura dos pneus, e consequentemente da resistência ao rolamento, seja bastante demorada, há um momento a partir do qual se considera que a influência na resistência ao rolamento é negligenciável. A Norma ISO 18164 (2005), que define os métodos de medição da resistência ao rolamento dos pneus, refere que, para veículos ligeiros, esse momento ocorre após 30 minutos de rolamento sob determinadas condições, nomeadamente, uma temperatura de 25°C, uma pressão nos pneus de 2,1 bars, aplicação de uma carga correspondente a 80% da capacidade máxima dos pneus e uma velocidade de 80 km/h.

Uma vez que as condições acima referidas, para determinação da resistência ao rolamento em veículos ligeiros, não podem ser totalmente replicadas nos ensaios realizados com o equipamento desenvolvido, uma vez que a carga imposta às rodas é relativamente baixa, assim como a velocidade máxima de circulação (20 km/h), procedeu-se a alguns ensaios com vista à determinação do tempo de estabilização do esforço de torque e, consequentemente, da resistência ao rolamento. Conclui-se assim que, para o equipamento desenvolvido, a velocidades entre os 5 e os 20 km/h, os pneus sujeitos a uma pressão de 2,1 bar, e níveis de carga entre 700 N e 1000 N, a estabilização do esforço de torque ocorre a partir dos 90 minutos.

### 2.2.2 Superfícies de pavimentos estudadas

Nesta fase do trabalho procedeu-se à construção de trechos experimentais com diferentes superfícies para realização de ensaios de avaliação da resistência ao rolamento, determinada através do consumo energético e do torque. Para tal, foram construídas diferentes superfícies de pavimentos, as quais se tentou que fossem suficientemente abrangentes para que se pudesse estudar com o equipamento a resistência ao rolamento sobre pavimentos com características superficiais variadas [8]. No presente trabalho, de forma a perceber-se as potencialidades do equipamento, serão apresentadas duas dessas superfícies: uma construída com uma mistura densa do tipo betão betuminoso - AC 14 surf 35/50 - (Figura 3) e outra obtida através da sobreposição de um *slurry seal* simples à mistura anterior (Figura 4).



Figura 3: Superfície resultante da aplicação da mistura AC 14 surf 35/50



Figura 4: Superfície resultante da aplicação do *slurry seal*

Assim, considerou-se fundamental a caracterização superficial das diferentes superfícies dos trechos estudadas, para garantir o cumprimento de valores especificados para esses parâmetros (essencial para garantir a necessária segurança de circulação) e de forma a ser possível relacionar essas características com os resultados da medição da resistência ao rolamento. Para proceder à caracterização superficial das misturas determinou-se, sobre cada trecho, a Profundidade Média da Textura (*Mean Texture Depth – MTD*), com base na Norma NP EN 13036-1 (2011), a Profundidade Estimada da Textura (*Estimated Texture Depth – ETD*), em conformidade com a Norma NP EN ISO 13473-1 (2011), e o Coeficiente de Atrito Pontual (*Pendulum Test Value – PTV*), com base na Norma EN 13036-4 (2011).

Na Figura 5 apresenta-se uma fotografia de um dos trechos construídos. Com os valores das medições efetuadas pelo laser (Figura 6) para cálculo do MPD, definiram-se ainda os perfis dos respetivos trechos.



Figura 5: Trecho construído com mistura betuminosa habitualmente utilizada em camadas de desgaste



Figura 6: Laser utilizado para medição e registo do perfil das superfícies de pavimento em estudo

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para as duas misturas em análise confirmaram que a sobreposição do *slurry seal* à superfície anterior, construída com uma mistura AC 14 surf 35/50, tornou a segunda superfície mais regular, tendo diminuído a sua textura, conforme se pode constatar pela análise da Tabela 1, na qual se apresentam os valores médios das características superficiais obtidas para os dois trechos em estudo.

Tabela 1: Valores médios das características superficiais nos dois trechos em estudo

Superfície	MTD (mm)	ETD (mm)	PTV
AC 14 surf 35/50	0,46	0,76	61
Slurry Seal	0,33	0,61	46

Com os valores das medições efetuadas pelo laser para cálculo do MPD, e a partir dos quais se determinaram os valores do ETD, definiram-se ainda os perfis do trechos construídos, os quais se apresentam nas Figuras 7 e 8.

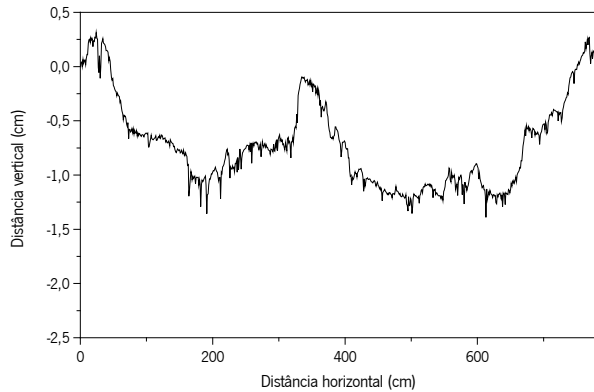


Figura 7: Perfil longitudinal do trecho construído com mistura AC 14 surf 35/50

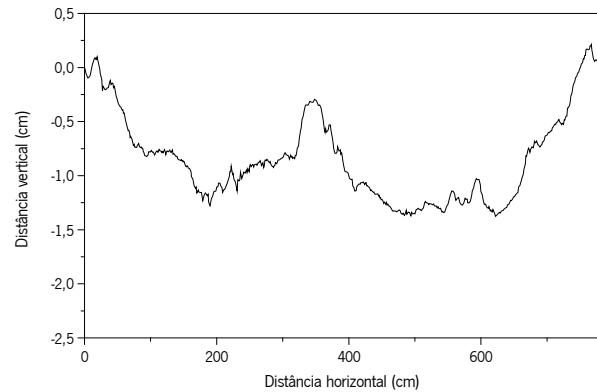


Figura 8: Perfil longitudinal do trecho resultante da sobreposição de *slurry seal* à mistura anterior

Pela análise das Figuras 7 e 8, são evidentes as semelhanças entre os dois perfis apresentados. As diferenças existentes entre eles consistem apenas numa suavização do perfil inicial decorrente da aplicação da camada de *slurry seal*.

Nas Figuras 9 e 10 apresentam-se as médias dos valores do esforço de torque e do consumo de energia, respetivamente, obtidos sobre as duas superfícies em estudo, para diferentes velocidades de circulação.

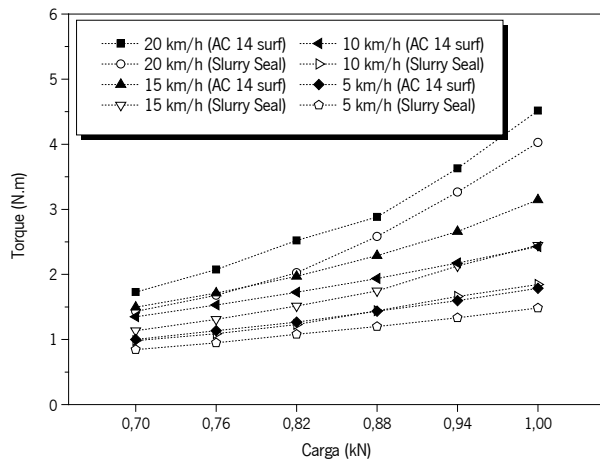


Figura 9: Média dos valores obtidos para o esforço de torque nas duas superfícies em estudo

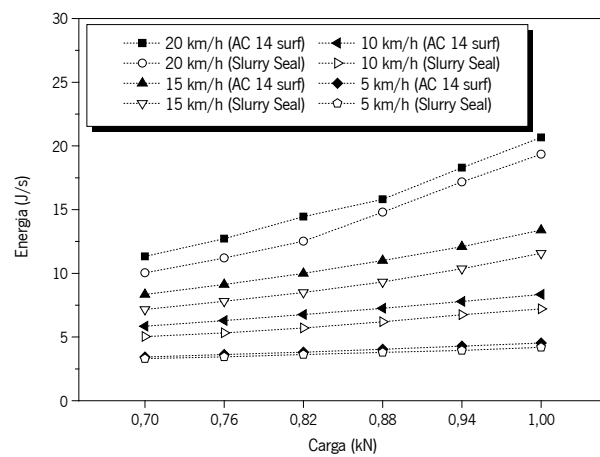


Figura 10: Média dos valores obtidos para o consumo de energia nas duas superfícies em estudo

A análise dos resultados obtidos permite concluir que a alteração das características superficiais do pavimento conduz, efetivamente, a uma correspondente variação da energia necessária para que o movimento ocorra. De facto, as duas superfícies em estudo apresentavam diferentes texturas, tendo a profundidade da textura da superfície construída com mistura AC 14 surf 35/50 diminuído com a sobreposição do *slurry seal*. Essa diminuição da textura da superfície traduziu-se numa consequente diminuição do esforço de torque e do consumo de energia registado.

Dado que as velocidades ensaiadas são relativamente baixas, considerou-se simplificada que as diferenças em termos de torque registado são devidas à resistência ao rolamento.

Ao estudar a utilização de energia relativa à média de dez modos de condução diferentes (incluindo aceleração e travagem), Bendtsen [9] concluiu que uma alteração da resistência ao rolamento (entre 1% e 50%) se traduz numa redução diferente da energia consumida pelos veículos (de 0,14% a 16,62%). Os valores obtidos experimentalmente poderão assim ser utilizados para estimar a poupança no consumo de combustível dos veículos que utilizarão determinada estrada ao longo do seu ciclo de vida. Recorrendo às relações anteriormente referidas, e apresentadas por Bendtsen, conclui-se que a adoção de uma camada de desgaste com as características superficiais resultantes da aplicação do *slurry seal* permitirá reduzir, comparativamente à circulação sobre a mistura AC 14 surf 35/50, o consumo de energia e, consequentemente de combustível e emissões gasosas para a atmosfera, em cerca de 1,55%.

#### 4. CONCLUSÕES

Durante o ciclo de vida dos pavimentos rodoviários existem impactes ambientais consideráveis, sendo que a sua fase de utilização por parte dos utentes implica o consumo de avultadas quantidades de combustíveis fósseis, os quais são cada vez mais escassos. Assim, o trabalho apresentado neste documento pretendeu contribuir em especial para a compreensão da influência que a resistência ao rolamento pode ter durante a fase de utilização de uma estrada.

Para tal, foi desenvolvido um equipamento (protótipo) constituído por 2 braços simétricos, com rodas nas extremidades exteriores, que giram em torno de um eixo central. Estando as rodas em contacto com a pista de ensaio (ou com o pavimento da estrada, no caso de ensaios *in situ*), o sistema desenvolvido permite determinar, de forma consistente, o consumo de energia e o esforço de torque necessários para que ocorra o movimento circular do equipamento, determinando-se assim as diferenças na resistência ao rolamento entre cada superfície de pavimento ensaiada.

Para se realizarem os ensaios com o protótipo, foram produzidos em laboratório alguns trechos (ou pistas) com diferentes características superficiais, cujas propriedades (PTV, ETD e MTD) tinham valores suficientemente diferentes para cobrir um leque de situações abrangente, tendo-se, no presente artigo, procedido à comparação de dois deles.

Da comparação dessas superfícies com diferentes texturas, verificou-se que podem existir diferenças de 1,55% do consumo de energia (combustível) e consequentemente das emissões gasosas libertadas para a atmosfera pelos veículos. Conforme referido anteriormente, e apesar desta redução não parecer muito significativa, ao ser acumulada pela passagem de milhões de veículos ao longo do ciclo de vida do pavimento, poderá ter um peso significativo na sustentabilidade da solução.

Os resultados até agora obtidos demonstram que este equipamento tem grande potencial para ser utilizado numa forma mais generalizada, conseguindo ser sensível às alterações das características superficiais das misturas utilizadas nos pavimentos e que influenciam a resistência ao rolamento e à desagregação, afirmando-se, por isso, como um meio de apoio à seleção de misturas betuminosas ou de processos construtivos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro e material dado por algumas instituições. Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade - COMPETE e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia - no âmbito do Projeto PLASTIROADS - PTDC/ECM/119179/2010.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] Capros, P. *et al*, “*Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables*”, Primes Model - E3MLab/NTUA, 2008, 49 p.
- [2] Santero, N.J. *et al*, “*Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review*”, *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, Vol. 55, pp. 801–809.
- [3] EAPA/Eurobitume, “*Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements*”, EAPA/Eurobitume Industry Report, 2004, 22 p.
- [4] Taylor, G.; Patten J. “*Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase IIF*”, Report Number CSTT-HVC-TR068, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2006, 76 p.

- [5] Wathne, L., “*Sustainability opportunities with pavements: are we focusing on the right stuff?*”, International Conference on Sustainable Concrete Pavements: Practices, Challenges and Directions, Sacramento, California, 2010, 18 p.
- [6] Araújo, J.P.C. *et al*, “The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, Vol. 32, pp. 97-110.
- [7] NTD, “*Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction*”, National Technology Development, New York, Report No. C-08-02, 2009, 50 p.
- [8] Araújo, J.P.C., “*Avaliação da sustentabilidade de estruturas e materiais de pavimentos rodoviários*”, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, 2016, 220 p.
- [9] Bendtsen, H., “Rolling resistance, fuel consumption - a literature review”, Denmark, 2004, 30 p.