

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO DE DIFERENTES MISTURAS BETUMINOSAS

João Paulo Araújo¹, Carlos Palha², Joel Oliveira³, Hugo Silva⁴, Paulo Pereira⁵

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: jparaujo.civil@gmail.com

² Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: cpalha@civil.uminho.pt

³ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: joliveira@civil.uminho.pt

⁴ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: hugo@civil.uminho.pt

⁵ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: ppereira@civil.uminho.pt

Resumo

Os pavimentos rodoviários são infraestruturas de grande importância para o desenvolvimento económico de qualquer país. Atualmente, o principal critério utilizado na conceção dessas infraestruturas deixou de ser apenas o seu menor custo, valorizando-se a perspetiva ambiental e procurando determinar todos os impactos de longo prazo (económicos, ambientais ou sociais) deste tipo de investimentos.

Nesse sentido, o consumo de combustível dos veículos que circulam nos pavimentos tem um peso significativo em termos económicos e ambientais, justificando a procura de soluções que permitam reduzir esse consumo de forma a garantir um desenvolvimento mais sustentável. No que diz respeito às características dos pavimentos, um dos fatores que mais influencia o consumo dos veículos é a resistência ao rolamento. Tendo em conta que as características dos pavimentos, em especial as superficiais, têm uma influência significativa nessa propriedade, com o presente trabalho pretendeu desenvolver-se uma metodologia de avaliação da resistência ao rolamento de misturas betuminosas com diferentes características superficiais. Assim, é possível avaliar que misturas ou características superficiais permitem contribuir para uma redução do consumo de combustível e das emissões de gases resultantes da sua queima ao longo do ciclo de vida de um pavimento.

A obtenção de resultados do consumo energético necessário para circular sobre diferentes misturas betuminosas foi conseguida através do desenvolvimento de um protótipo. O consumo energético do movimento circular das rodas, equipadas com pneus convencionais de veículos ligeiros, foi medido para diferentes superfícies e a sua utilização para a avaliação da sustentabilidade das misturas estudadas é analisada no presente artigo.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Resistência ao rolamento; Consumo de combustível; Análise do Ciclo de Vida

1 Introdução

As preocupações com a sustentabilidade estão cada vez mais presentes no quotidiano das pessoas, assumindo-se já como um fator de ponderação na tomada de decisões, em complemento às vertentes económica e de durabilidade de uma determinada solução ou produto. No entanto, no caso dos pavimentos rodoviários existe ainda um grande caminho a percorrer.

Não são ainda totalmente conhecidas as consequências ambientais da construção de estradas, e em particular dos pavimentos rodoviários, ao longo do tempo, isto é, durante o seu ciclo de

vida. 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 [1].

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 [2].

Existem ainda diversos fatores que não são tidos em devida conta, nomeadamente a qualidade superficial exigida aos pavimentos rodoviários e que se tem baseado essencialmente na segurança e comodidade dos utentes das estradas. Características como essa estão, no entanto, intimamente relacionadas com o ambiente e a sustentabilidade, podendo determinadas estruturas de pavimentos ou determinadas camadas, como a de desgaste, ter uma influência considerável na interação com este.

Nesse sentido, o trabalho aqui reportado compreende o desenvolvimento de uma metodologia de análise da sustentabilidade de diferentes materiais e estruturas de pavimentos dando especial relevo ao período de exploração/utilização das estradas.

Tendo presentes alguns estudos que referem que os pavimentos mais rígidos e/ou menos rugosos obrigam a um menor consumo de combustível [3; 4], pretende-se determinar a influência de variáveis como a textura dos pavimentos na resistência ao rolamento e, por conseguinte, no consumo de combustível dos veículos. Para tal, a referida metodologia baseia-se na realização de ensaios experimentais, recorrendo a um protótipo construído para o efeito, com o intuito de avaliar a influência do tipo de camada de desgaste utilizada num pavimento na variação do consumo de energia necessária à circulação.

Os resultados assim obtidos destinam-se a integrar uma Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida entretanto desenvolvida, a qual permite, para os pavimentos em estudo, quantificar e comparar o consumo de energia e as emissões de gases. Os gases considerados são CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ e NO_x, dando-se depois especial atenção ao CO₂, CH₄ e N₂O 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 [5].

Em resumo, sem desprezar as fases de obtenção dos materiais e construção da estrada, este trabalho dá 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 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.

2 Materiais e métodos

2.1 Protótipo para avaliação da resistência ao rolamento

Conforme referido anteriormente, foi desenvolvido um protótipo (Figura 1) para avaliar a resistência ao rolamento oferecida pelos diferentes pavimentos, de forma a obter as diferenças de consumo de combustível pelos veículos imputáveis à circulação em cada uma das superfícies.

De uma forma geral, este equipamento é constituído por um elemento central (veio), o qual garante a fixação do protótipo 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.



Figura 1 Protótipo desenvolvido para avaliação da resistência ao rolamento

Os braços são constituídos por módulos metálicos, os quais, juntamente com as diversas componentes de ligação, perfazem um raio de 1,25 metros (entre o eixo de rotação e o centro das rodas). 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 irregularidades do pavimento. As rodas são direcionáveis, permitindo os braços superiores dotá-las de uma inclinação até 5° relativamente à trajetória normal, através do ajustamento de varões roscados. A velocidade de circulação das rodas é variável, podendo atingir um máximo de 20 km/h.

Junto à roda não motriz, encontra-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.

O equipamento possui ainda, sobre os braços inferiores, junto a cada uma das rodas, uma base para suporte de pesos adicionais, 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 provoca 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.

Após o início do movimento dos veículos, a temperatura dos pneus vai aumentando, acabando depois por estabilizar. À medida que a temperatura dos pneus aumenta, 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 define que, para veículos ligeiros, esse momento ocorre após 30 minutos de rolamento sob determinadas condições de ensaio, nomeadamente, temperatura, pressão dos pneus, carga e velocidade.

Assim, a referida norma recomenda o rolamento durante pelo menos 30 minutos antes de efetuar a primeira medição de resistência ao rolamento e, caso se pretenda efetuar medições a velocidades diferentes, um funcionamento à nova velocidade durante pelo menos 20 minutos antes de efetuar as medições.

Uma vez que algumas das condições impostas pela norma ISO 18164, para determinação da resistência ao rolamento em veículos ligeiros, não são idênticas às dos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido, procedeu-se a alguns ensaios preliminares com vista à determinação do tempo necessário à estabilização do esforço de torque a que o motor fica sujeito para que ocorra o movimento circular e, conseqüentemente, da resistência ao rolamento, tendo-se concluído serem necessários 60 minutos de funcionamento do protótipo para que esse valor estabilize e se possa proceder à medição da resistência ao rolamento.

2.2 Metodologia de avaliação do ciclo de vida dos pavimentos

Devido à dificuldade de obtenção de dados relativos a todas as fases do ciclo de vida, a maioria das metodologias existentes para análise do ciclo de vida de pavimentos rodoviários concentram-se quase exclusivamente nas atividades de extração, produção, transporte e aplicação de materiais, isto é, na construção de estrada [1]. Sendo a fase de utilização predominante no que diz respeito ao consumo de energia (combustível) e, conseqüentemente, nas emissões gasosas libertadas para a atmosfera, desenvolveu-se uma metodologia mais abrangente, que considera todas as fases do ciclo de vida, com especial atenção na fase de utilização, sendo um dos seus *inputs* os resultados obtidos experimentalmente com o protótipo anteriormente apresentado. A referida metodologia de avaliação do ciclo de vida dos pavimentos rodoviários foi já apresentada numa publicação anterior [6] pelo que se dispensa aqui uma descrição mais pormenorizada.

Para o presente estudo considerou-se a construção de uma estrada constituída por duas vias (uma em cada sentido, com 3,5 m de largura) e pelas bermas (com 1,0 m cada uma), perfazendo uma largura total de 9,0 m. Os cálculos foram feitos para um comprimento de referência de 1 km, tendo-se considerado para todas as alternativas as mesmas distâncias médias de transporte dos materiais (10 km).

A comparação das soluções em estudo visou, sobretudo, avaliar o consumo de energia, bem como as emissões de CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ e de NO_x imputáveis à construção de cada pavimento. As emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, por se tratar de gases com efeito de estufa, foram posteriormente convertidas em emissões de CO₂-equivalente, utilizando os fatores de conversão de 1, 23 e 296, respetivamente [7], obtendo-se dessa forma o potencial de aquecimento global (Equação 1).

$$\text{GWP}=\text{CO}_2+23\cdot\text{CH}_4+296\cdot\text{N}_2\text{O} \quad (1)$$

2.3 Análise comparativa do consumo de combustível

Conforme referido anteriormente, uma maior resistência ao rolamento conduzirá a um maior consumo de combustível. Assim, depois de avaliada a resistência ao rolamento de cada um dos pavimentos em estudo, pretende estimar-se o consumo de combustível imputável ao tráfego de projeto, bem como as diferenças esperadas entre os pavimentos. Para tal, tomar-se-ão como referência os valores de 9,15 l/100km, 39,42 l/100km e 45,37 l/100km para os consumos médios dos veículos ligeiros, dos pesados de mercadorias e dos pesados de passageiros, respetivamente [8].

2.4 Caracterização física das misturas estudadas

As misturas estudadas foram três: uma mistura AC14 surf 35/50, uma camada delgada constituída por uma Argamassa betuminosa 0/4 e uma mistura semi-flexível (*Grouted macadam*) obtida através da sobreposição de uma calda de cimento a uma mistura drenante. Na Figura 2 pode ver-se o aspeto superficial das misturas estudadas.



Figura 2 Aspeto superficial das misturas ensaiadas com o protótipo

Antes e após a realização de cada conjunto de ensaios, às várias velocidades estudadas e fazendo variar a carga nas rodas entre 0.7 e 1 kN, procedeu-se à caracterização superficial das misturas através da determinação dos valores do MPD (*Mean Profile Depth*) com recurso ao laser instalado no braço existente no protótipo para esse efeito (Norma EN ISO 13473-1), do MTD (*Mean Texture Depth*) com recurso ao método da mancha de areia (Norma EN 13036-1) e do PTV (*Pendulum Test Value*) com recurso ao Pêndulo Britânico (Norma EN 13036-4). Converteu-se depois o MPD em ETD (*Estimated Texture Depth*) recorrendo à Equação 2:

$$ETD=0.2\text{mm}+0.8\text{MPD} \quad (2)$$

onde ETD e MPD são expressos em milímetros (mm).

2.5 Estruturas de pavimentos em estudo

As três misturas anteriormente apresentadas foram depois consideradas para a camada de desgaste de três estruturas de pavimento. A constituição dessas estruturas difere apenas na camada de desgaste, sendo as restantes camadas compostas por duas camadas de macadame betuminoso (AC20 bin 35/50 e AC20 base 35/50) e duas camadas granulares (base e sub-base).

As propriedades mecânicas das misturas utilizadas nas várias camadas betuminosas que constituem os pavimentos foram obtidas experimentalmente, nomeadamente, os módulos de rigidez (através de ensaios de flexão a 4 pontos, para uma temperatura de 20 °C e uma frequência de 8 Hz). Os módulos de rigidez da mistura AC14 surf 35/50, da Argamassa Betuminosa 0/4 e do *Grouted Macadam* são, respetivamente, 4500, 2000 e 7500MPa, sendo os Módulos das restantes misturas (comuns às três estruturas) apresentadas na Figura 3.

Misturas estudadas (Fig 2)	
AC20 bin 35/50	5900 MPa
AC20 base 35/50	5900 MPa
Base granular	400 MPa
Sub-base granular	200 MPa
Fundação	100 MPa

Figura 3 Representação esquemática das estruturas dos pavimentos consideradas

Os três pavimentos foram dimensionados de forma a suportarem o tráfego apresentado na Tabela 1, tendo presente que o ano de entrada em serviço do pavimento é o de 2015 e o seu período de vida corresponde a 20 anos, sendo expectável uma taxa de crescimento do tráfego de 1% nos primeiros 10 anos e 3% nos restantes.

Tabela 1. Tráfego por sentido no ano de entrada em serviço do pavimento (2015)

Veículos	Classe	Nº de veículos por dia
Ligeiros	D	20.720
	E	454
Pesados de mercadorias	F1	470
	F2	293
	G1	130
	G2	76
	H1	108
	H2	191
	H3	79
Pesados de passageiros	I	44

A partir destes dados determinou-se o tráfego de projeto, que se traduziu na passagem de $9,2 \times 10^7$ eixos-padrão de 80 kN durante a vida útil do pavimento.

Determinaram-se depois as espessuras das várias camadas dos pavimentos, recorrendo ao *software* BISAR 3.0, para que ambas as estruturas de pavimentos em estudo fossem capazes de suportar a passagem do número de eixos-padrão anteriormente referido, de acordo com os critérios de ruína da Shell. Assim, a extensão radial de tração na parte inferior da camada de base betuminosa (ϵ_t) e a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (ϵ_{dp}) foram determinadas e, recorrendo às Equações 3 e 4, determinou-se o número de eixos-padrão admissível por cada um dos critérios, considerando-se como critério crítico (ϵ_t ou ϵ_{dp}) aquele que admite a passagem de um menor número de eixos-padrão.

$$\epsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times S^{-0,36} \times N_{80}^{-0,20} \quad (3)$$

$$\epsilon_{dp} = 1,8 \times 10^{-2} \times N_{80}^{-0,25} \quad (4)$$

onde ϵ_t é a extensão radial de tração na parte inferior da camada de base betuminosa, V_b é o volume de betume (%), S é o módulo de rigidez da mistura (Pa), N_{80} é o tráfego de projeto e ϵ_{dp} a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação.

A determinação das espessuras das camadas dos pavimentos foi efetuada recorrendo a um processo iterativo até que o dano provocado ao pavimento no final da sua vida útil estivesse compreendido entre 80% e 100%. As espessuras das diferentes camadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Espessuras das várias camadas das diferentes estruturas de pavimento (mm)

Camada	Estrutura 1 (AC14 surf 35/50)	Estrutura 2 (Argam. Betum. 0/4)	Estrutura 3 (Grouted Macadam)
Desgaste	40	10	40
AC20 bin 35/50	80	90	70
AC20 base 35/50	80	100	80
Base granular	150	150	150
Sub-base granular	150	150	150

3 Análise dos resultados

3.1 Características das misturas utilizadas em camada de desgaste

A caracterização superficial permitiu obter os valores de ETD, MTD e PTV apresentados na Tabela 3 para as diferentes misturas em estudo.

Tabela 3. Valores obtidos nos ensaios de caracterização superficial das misturas em estudo

Mistura	ETD	MTD	PTV
AC14 surf 35/50	0,737	0,445	60,00
Argam. Betum. 0/4	0,644	0,344	44,50
<i>Grouted Macadam</i>	0,524	0,290	37,63

Os resultados do ETD, MTD e PTV encontram-se dentro do expectável, isto é, a mistura AC14 surf 35/50 é a mais rugosa, seguida da Argamassa Betuminosa 0/4 e do *Grouted Macadam* que é a mistura menos rugosa. Tendo em conta que para texturas mais rugosas o valor de PTV será mais elevado, os resultados obtidos estão dentro desse pressuposto, sendo o valor do atrito na mistura AC14 surf 35/50 superior ao da Argamassa Betuminosa 0/4 e ao do *Grouted Macadam*, apresentando este último o valor mais baixo de PTV. É também visível que os valores da altura média de areia, determinados no ensaio de mancha de areia, e do ETD, determinados através do laser, são proporcionais aos valores do PTV. Conclui-se desta forma que a mistura AC14 surf 35/50 é a mais rugosa e com maior atrito, seguida da Argamassa Betuminosa 0/4, a qual, por sua vez, é mais rugosa e com maior atrito que o *Grouted Macadam*.

3.2 Consumo de energia das diferentes misturas

Os resultados obtidos experimentalmente, com recurso ao protótipo apresentado na secção 2.1, para o torque a que o motor fica sujeito ao circular em cada mistura são resumidamente apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios do torque obtido com o protótipo para as diferentes misturas (Nm)

Mistura	5 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h
AC14 surf 35/50	3,5964	6,2711	9,1652	12,9018
Argam. Betum. 0/4	3,3873	5,3739	7,8445	11,7718
<i>Grouted Macadam</i>	3,1562	4,9203	7,2458	-

Dado que as velocidades ensaiadas são relativamente baixas, considerou-se simplificarmente que as diferenças em termos de torque eram 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 (de 0,14% a 16,62%).

Considerando a média dos valores apresentados na Tabela 4, e efetuando a respetiva conversão em termos de energia proposta por Bendtsen [9], concluiu-se que a circulação sobre a Argamassa Betuminosa 0/4 conduz a uma redução de 1.62% do consumo de combustível face à mistura AC 14 surf 35/50, e que a circulação sobre o *Grouted Macadam* ocorre também com menor dispêndio de energia, permitindo uma redução de 2.61% da energia consumida para circular sobre a mistura AC14 surf 35/50.

De acordo com estes dados, verifica-se que a circulação sobre pavimentos mais rugosos e com maior atrito conduz, de facto, a um maior dispêndio de energia, isto é, a um maior consumo de combustível.

3.3 Análise dos impactos e dos custos de construção dos diferentes pavimentos

Conforme apresentado anteriormente, as três estruturas em estudo apresentam uma constituição bastante semelhante, diferindo apenas na composição da camada de desgaste e nas espessuras das camadas betuminosas. Apesar de não parecerem muito significativas, essas diferenças traduzem-se em diferenças no consumo de recursos necessários à construção de cada uma delas, apresentando-se os resultados da sua quantificação na Tabela 5.

Tabela 5. Consumo de recursos por km de pavimento construído para cada estrutura em estudo

Pavimento	Volume (m ³)	Mat. Gran (ton)	Agregados (ton)	Betume (ton)	Cimento (ton)
Estrutura 1	4500	5265	4020,2	209,8	-
Estrutura 2	4500	5265	4017,0	213,0	-
Estrutura 3	4410	5265	3682,4	195,7	28,8

Conclui-se assim que as estruturas 1 e 2 obrigam a consumos semelhantes de recursos materiais para a sua construção, uma vez que a espessura total é a mesma para estas duas estruturas, variando apenas as suas composições. A estrutura 3, por apresentar uma espessura mais reduzida em 1 cm, conduz a uma poupança de agregados e de betume, embora obrigue à utilização de cimento, o qual não era necessário para as outras duas soluções.

Os resultados relativos ao consumo de energia e às emissões obtidas para a construção de 1 km de pavimento são apresentados na Tabela 6 e na Figura 4.

Tabela 6. Consumo de energia e emissões por km de pavimento construído

Pavimento	Consumo de energia (TJ)	Emissões (kg)					
		CO ₂ (ton)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	SO ₂ (ton)	NO _x (ton)	CO ₂ -eq (ton)
Estrutura 1	1,913	114,429	0,060	0,707	0,206	0,579	114,639
Estrutura 2	1,914	114,973	0,060	0,707	0,208	0,582	115,183
Estrutura 3	1,934	130,662	0,058	0,693	0,221	0,605	130,869

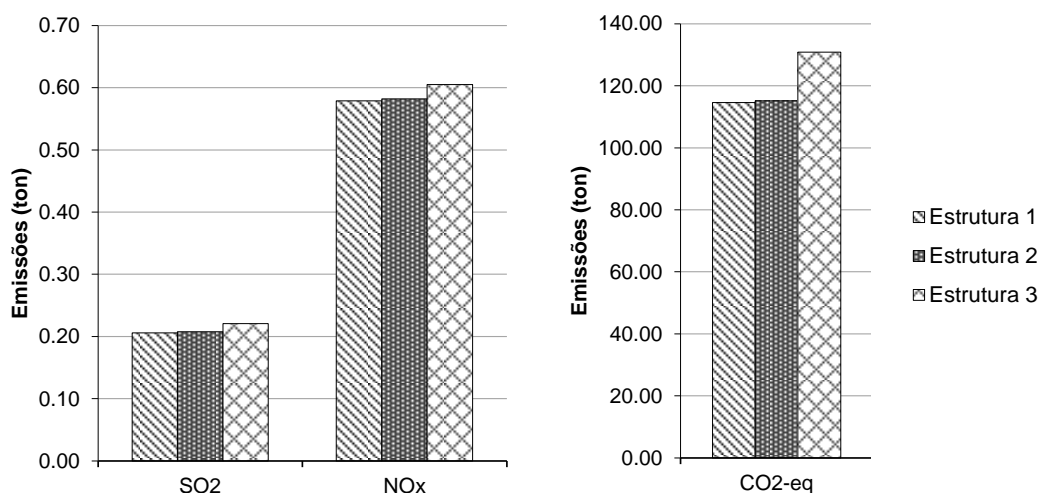


Figura 4 Emissões de SO₂, NO_x e CO₂-eq por km de pavimento construído

Comparando as três alternativas, conclui-se que as estruturas 1 e 2 conduzem a emissões semelhantes, enquanto a estrutura 3, apesar de ser mais fina 1 cm, obriga a um maior dispêndio de energia para a sua construção, conduzindo simultaneamente a maiores emissões gasosas para atmosfera, facto que se deve à utilização de cimento. De referir que, em termos de CO₂-eq, e consequentemente do GWP (Equação 1), esse aumento foi de aproximadamente 13.9%.

3.4 Análise dos impactes e dos custos de circulação nos diferentes pavimentos

Tendo em conta o tráfego de projeto apresentado na Tabela 1 e os valores médios dos consumos de combustível indicados na Secção 2.3, procedeu-se ao cálculo do combustível consumido pelo tráfego de projeto da estrada em estudo, durante o período de vida da mesma (entre 2015 e 2035), apresentando-se os resultados na Tabela 7.

Tabela 7. Consumo de combustível do tráfego de projeto durante a vida útil da estrada

Veículos	Classe	Nº Acum. Veículos (2015-2035)		Consumo (l/km)	Consumo total (l/km)
Ligeiros	D	349.786.568	357.450.810	0,09149369	32.704.494
	E	7.664.242			
Pesados de mercadorias	F1	7.934.348	22.739.503	0,3942179	8.964.319
	F2	4.946.306			
	G1	2.194.607			
	G2	1.283.001			
	H1	1.823.212			
	H2	3.224.384			
	H3	1.333.646			
Pesados de passageiros	I	742.790	742.790	0,4537478	337.039
Total					42.005.852

Assumindo o consumo de combustível de 42.005.852 l/km como o consumo imputável à estrutura 1 (com a mistura AC14 surf 35/50 na camada de desgaste), a construção da mesma estrada com recurso às estruturas 2 ou 3 permitiria reduzir este consumo em 1,62% e em 2,61%, respetivamente, isto é, permitiria poupar durante o ciclo de vida do pavimento 680.495 litros ou 1.096.353 litros, respetivamente, por cada km de estrada construída.

Tendo em conta que no ano de 2013 as vendas de gasóleo, gasolina sem chumbo 95 e gasolina sem chumbo 98 representaram, respetivamente, 78,77%, 19,71% e 1,52% das vendas de combustível [10], o combustível poupado com a utilização da camada de desgaste em Argamassa Betuminosa 0/4 seria de 536.029 litros de gasóleo por km, 134.125 litros de gasolina sem chumbo 95 por km e 10.341 litros de gasolina sem chumbo 98 por km, enquanto o combustível poupado com a utilização do *Grouted Macadam* seria, respetivamente, 863.603, 216.090 e 16.660 litros por km de estrada

Considerando a média dos preços destes 3 combustíveis, praticados durante o ano de 2013 em Portugal [10], essa redução de consumos traduzir-se-ia numa poupança de 971.431,60 €/km para a estrutura 2 e de 1.565.084,16 €/km para a estrutura 3, conforme demonstram as Tabelas 8 e 9, respetivamente.

Tabela 8. Poupança imputável à circulação sobre a estrutura 2

Combustível	% de vendas em Portugal	Litros poupados	Preço médio 2013	Valor poupado por km de estrada
Gasóleo	78,77%	536.029	1,386 €/l	742.847,53 €
Gasolina s/ chumbo 95	19,71%	134.125	1,576 €/l	211.425,67 €
Gasolina s/ chumbo 98	1,52%	10.341	1,659 €/l	17.158,39 €
Total				971.431,60 €

Tabela 9. Poupança imputável à circulação sobre a estrutura 3

Combustível	% de vendas em Portugal	Litros poupados	Preço médio 2013	Valor poupado por km de estrada
Gasóleo	78,77%	863.603	1,386 €/l	1.196.809,86 €
Gasolina s/ chumbo 95	19,71%	216.090	1,576 €/l	340.630,23 €
Gasolina s/ chumbo 98	1,52%	16.660	1,659 €/l	27.644,07 €
Total				1.565.084,16 €

Recorrendo à metodologia apresentada na Secção 2.2 procedeu-se também à análise das emissões resultantes da circulação do tráfego sobre as diferentes superfícies de pavimento, as quais serão, naturalmente, diferentes devido às diferenças de combustível consumido, conforme demonstra a Tabela 10.

Tabela 10. Emissões resultantes da circulação do tráfego sobre as diferentes estruturas (ton)

Estrutura	CO ₂	SO ₂	NO _x
1	118.368,47	55,64	640,10
2	116.450,90	54,74	629,73
3	115.279,05	54,19	623,39

Conclui-se que a adoção da estrutura 2 (com Argamassa Betuminosa 0/4) permite reduzir, durante a vida útil da estrada, e comparativamente com a estrutura com AC14 surf 35/50 na camada de desgaste, as emissões de CO₂ em 1.917,57 toneladas, as emissões de SO₂ em 0,90 toneladas e as emissões de NO_x em 10,37 toneladas. Da mesma forma, a adoção da estrutura 3 (com *Grouted Macadam*) permite reduzir as emissões de CO₂, SO₂ e NO_x em 3.089,42, 1,45 e 16,71 toneladas, respetivamente.

Verifica-se assim que, apesar da estrutura 3 apresentar maior consumo de energia e de emissões gasosas durante a fase de construção, essa desvantagem é, de acordo com os dados obtidos, largamente ultrapassada pelas vantagens económicas e ambientais resultantes durante a fase de utilização da estrada. Com efeito, a adoção da estrutura 3, que na fase de construção implicaria um acréscimo das emissões de CO₂ de 16,23 ton/km comparativamente com a estrutura 1, permitirá ao longo do período de vida útil da estrada reduzir as emissões de CO₂ em 3.089,42 ton/km.

4 Conclusões

No presente trabalho pretendeu avaliar-se a influência da resistência ao rolamento, provocada pela camada de desgaste, na sustentabilidade de diferentes pavimentos rodoviários. Para tal,

consideraram-se três estruturas de pavimentos, as quais diferiam apenas na composição da camada de desgaste e nas espessuras das camadas betuminosas. As camadas de desgaste consideradas foram um betão betuminoso convencional (AC14 surf 35/50) uma Argamassa Betuminosa 0/4 e um *Grouted Macadam* (constituído por uma mistura drenante à qual foi sobreposta uma calda de cimento que preencheu os vazios, resultando num pavimento do tipo semi-flexível). O dimensionamento das três estruturas foi feito de forma a suportarem o tráfego de projeto a que seriam sujeitas, e procurando que o dano no final da vida útil do pavimento fosse o mais parecido possível entre as estruturas. Em termos de espessura global dos pavimentos, não há diferenças entre as estruturas 1 e 2, sendo que a estrutura 3 conta com menos 1 cm de espessura no total das camadas betuminosas. Assim, esta estrutura obriga a um menor consumo de material (agregados e betume), além de permitir uma redução da energia consumida durante a produção das misturas betuminosas, no entanto, a produção e aplicação da calda de cimento acabam por aumentar o consumo de energia e as emissões gasosas libertadas para a atmosfera, tornando esta solução menos vantajosa face às outras duas se a análise se limitar apenas às fases obtenção dos materiais e construção da estrada.

Sendo um dos principais objetivos deste trabalho avaliar a resistência ao rolamento, procedeu-se à construção de protótipo para medir a influência das características superficiais no torque a que o motor é sujeito para movimentar as duas rodas desse equipamento. Os ensaios laboratoriais realizados com as três misturas consideradas neste estudo permitiram concluir que a Argamassa Betuminosa 0/4 permitirá reduzir o consumo de energia (e conseqüentemente, de combustível) em 1,62% comparativamente com a mistura AC14 surf 35/50 e que o *Grouted Macadam* permitirá reduzir esse mesmo consumo em 2,61%. Concluiu-se assim que a utilização desta mistura, com menor macrot textura, conduz a uma redução da resistência ao rolamento e, conseqüentemente, do combustível consumido pelos veículos. Para a situação em análise, demonstrou-se que a redução de 2,61% da energia consumida, obtida em laboratório, permitiria poupar durante a vida útil do pavimento (20 anos) mais de 1.565.084 € por cada km de estrada construída e reduzir as emissões de CO₂ em 3.089,42 toneladas.

Estes resultados carecem ainda de uma validação mais profunda, considerando desde logo outras estruturas para além destas, bem como a influência de outras variáveis para a resistência ao rolamento (como o tipo de pneu, a irregularidade longitudinal, entre outras). No entanto, demonstram claramente a importância deste tema na sustentabilidade dos pavimentos rodoviários.

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] Santero, N.J.; Masanet, E.; Horvath, A. "Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, pp. 801–809, 2011.
- [2] EAPA/Eurobitume. "Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements", EAPA / Eurobitume Industry Report, March 2004.
- [3] Taylor, G.; Patten J. "Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III", Report Number CSTT-HVC-TR068, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2006.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] Araújo, J.P.C.; Oliveira, J.R.M.; Silva, H.M.R.D. “The importance of the use phase on the LCA of environmentally friendly solutions for asphalt road pavements”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 32, pp. 97-110, 2014.
- [7] Huang, Y.; Bird, R.; Heidrich, O. “Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, pp. 283–296, 2009.
- [8] Gomes, P.; Lopes, M.; Martins, H.; Carvalho, J.; Silva, J.V.; Teixeira, P. “Custos e Benefícios, à escala local, de uma Ocupação Dispersa – Anexo 8: Custos internos e externos de Mobilidade em Portugal”, Aveiro, 2011.
- [9] Bendsen, H. “Rolling resistance, fuel consumption - a literature review”, Denmark, 2004.
- [10] DGEG. “Combustíveis fósseis - estatísticas rápidas - dezembro 2013”, Direcção Geral de Energia e Geologia, nº103, 2013.