

# AVALIAÇÃO DO EFEITO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL NA VIDA DO PAVIMENTO USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DE FRONTEIRA

Arminda Almeida<sup>1</sup>, Luís Picado-Santos<sup>2</sup> e Silvino Capitão<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra, Portugal

email: [arminda@dec.uc.pt](mailto:arminda@dec.uc.pt) <http://www.uc.pt/ctuc/dec>

<sup>2</sup>DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>IPC - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

---

## Sumário

*Este artigo avalia o efeito da irregularidade na vida do pavimento. Foram modelados perfis com diferentes níveis de irregularidade que foram usados num programa de simulação de veículos, obtendo-se perfis de carga para diferentes velocidades e carregamentos. De seguida, a resposta foi calculada para a carga relevante de cada perfil. A modelação da evolução da irregularidade, assim como a modelação da redução do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa foram considerados na análise. Os resultados mostram que a irregularidade reduz drasticamente a vida do pavimento, principalmente se a modelação do módulo também for considerada na análise. Assim sendo, a irregularidade não deve ser negligenciada no dimensionamento.*

---

**Palavras-chave:** Pavimentos Rodoviários Flexíveis; Irregularidade Longitudinal; Método dos Elementos de Fronteira; Simulação de veículos; Dano

## 1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis considera correntemente dois mecanismos de degradação, fadiga e deformação permanente. Todavia, a presença de outras degradações na estrutura do pavimento influencia fortemente a sua resposta. Por exemplo, a irregularidade longitudinal excita as cargas aplicadas pelos veículos ao pavimento provocando perfis de carga superiores ao perfil estático, os quais poderão ser ainda mais gravosos aquando da presença de fendas a partir da superfície do pavimento.

O trabalho apresentado faz parte de uma tese de doutoramento em curso que visa avaliar o efeito destas degradações superficiais na resposta do pavimento e conseqüentemente na vida do pavimento usando o método dos elementos de fronteira. A escolha pelo método dos elementos de fronteira deveu-se ao tipo de estrutura e degradações a analisar que permitem tirar partido das suas vantagens: apenas requer a discretização da fronteira, oferece vantagens na análise de domínios infinitos e semi-infinitos e é mais adequado que o método dos elementos finitos em problemas com concentração de tensões.

Este artigo avalia o efeito da irregularidade longitudinal na vida de duas estruturas de pavimento, uma delgada e uma espessa. Para tal foram gerados perfis com diferentes níveis de irregularidade, os quais foram usados num programa de simulação de veículos pesados (TruckSIM<sup>®</sup>) de modo a obter perfis de carga para diferentes velocidades de circulação e diferentes carregamentos. De seguida, e atendendo ao conceito de repetibilidade espacial, a resposta do pavimento foi calculada para a carga relevante de cada perfil. A evolução da irregularidade assim como a redução do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa ao longo da vida do pavimento foram considerados na análise, a partir de modelos de evolução descritos na bibliografia e pela divisão da vida do pavimento em incrementos de tempo necessários à completa descrição dos efeitos.

Os resultados mostram que a irregularidade longitudinal reduz drasticamente a vida do pavimento, principalmente se os dois modelos de evolução (irregularidade e módulo) são considerados na análise. Assim sendo, a irregularidade longitudinal não deve ser negligenciada no dimensionamento do pavimento. As cargas dinâmicas aceleram a degradação da capacidade estrutural dos pavimentos.

## 2 INTERAÇÃO VEÍCULO-PAVIMENTO

### 2.1 Considerações gerais

De modo a avaliar o efeito da irregularidade longitudinal na vida do pavimento é necessário considerar a interação veículo-pavimento. Essa interação é considerada simulando, a partir de software apropriado, veículos pesados rolando sobre superfícies com diferentes níveis de irregularidade, a diferentes velocidades e com diferentes níveis de carga. A evolução da irregularidade ao longo da vida do pavimento é incorporada na análise usando um modelo de evolução da irregularidade.

### 2.2 Geração de perfis de irregularidade

A simulação de veículos requer perfis de irregularidade como input. Assim sendo, foram gerados perfis de irregularidade unidimensionais com diferentes níveis de irregularidade definidos a partir dos correspondentes valores de densidade espectral. Cebon e Newland ([1], [2]) descrevem o procedimento usado na geração dos perfis de irregularidade, o qual foi implementado usando o MATLAB<sup>®</sup> [3]. Os perfis foram gerados para uma gama de comprimentos de onda capaz de excitar as vibrações predominantes para as diferentes velocidades de circulação, e a distribuição das amplitudes pelos comprimentos de onda seguiu o definido na norma internacional ISO 8608 [4].

A Fig. 1 mostra os perfis de irregularidade gerados. A Fig. 2 apresenta o enquadramento dos perfis de irregularidade nos limites das classes definidos na norma internacional ISO 8608 [4] e os valores do IRI (International Roughness Index) verificados pelo software ProVAL desenvolvido pela ERD (Engineering Research Division) da UMTRI (University of Michigan, Transportation Research Institute) [5].

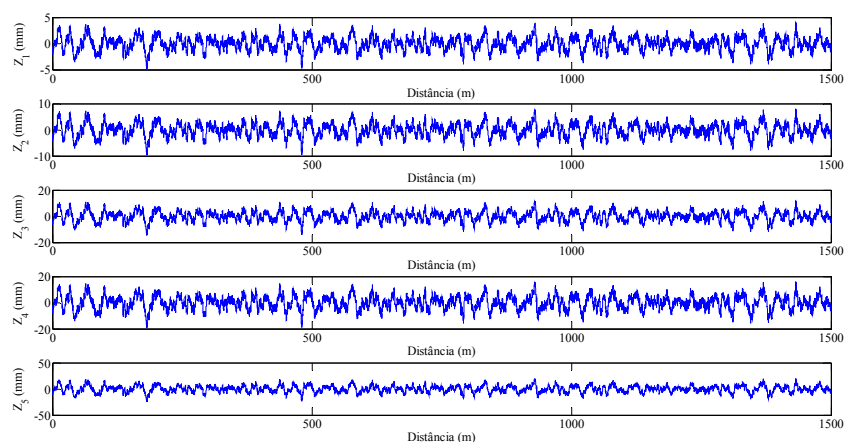


Fig. 1. Perfis de irregularidade

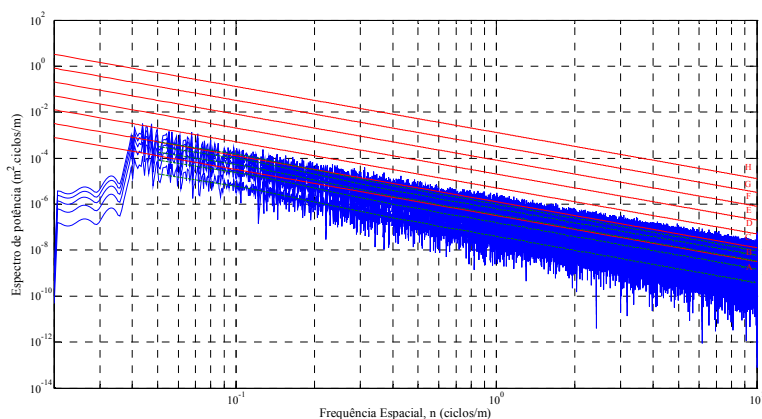


Fig. 2. Enquadramento dos perfis de irregularidade nas classes da norma ISO 8608 [4]

### 2.3 Modelo de evolução da irregularidade

Considerou-se o modelo de evolução do sistema de gestão de pavimentos Sueco [6]. O modelo foi desenvolvido tendo por base medições de irregularidade longitudinal. O comprimento total medido foi de 700000 km (1987 a 2000), o que significa que as estradas pavimentadas (77000 km) foram medidas várias vezes. O modelo geral consiste na seguinte equação

$$IRI_{ano\ t} = IRI_0 + \Delta_{IRI} \cdot t \quad (1)$$

Os valores de  $IRI_0$  e de  $\Delta_{IRI}$  dependem do tráfego e do clima. Relativamente ao tráfego, considerou-se a classe D, que corresponde à classe T6 do MACOPAV [9], para a estrutura delgada e a classe G, que corresponde à classe T1 do MACOPAV [9], para a estrutura espessa. No que respeita ao clima, considerou-se a média das quatro regiões climáticas. A Fig. 3 ilustra a evolução da irregularidade. O modelo é aplicado a ambas as estruturas, considerando  $IRI_0$  igual a 1.67 m/km e  $\Delta_{IRI}$  igual a 0.07 m/km na estrutura delgada e 1.24 m/km e 0.05 m/km, respetivamente, na estrutura espessa.

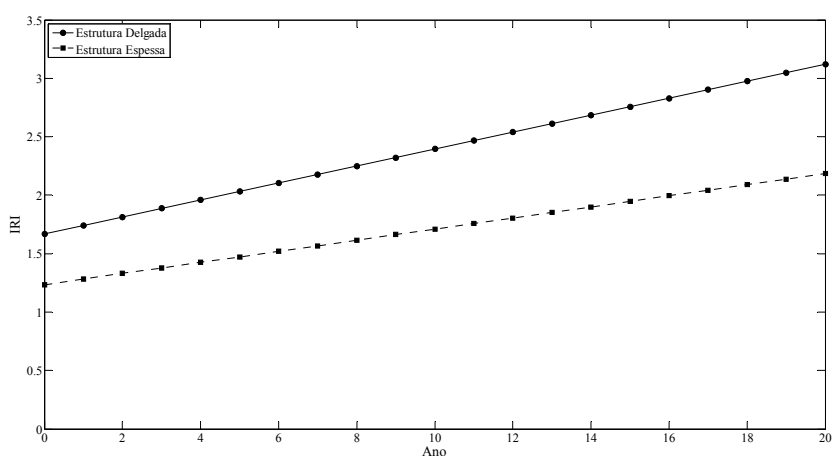


Fig. 3. Evolução da irregularidade para a estrutura delgada e espessa

### 2.4 Simulação de veículos

Neste trabalho usou-se o software TruckSIM® da MSC (Mechanical Simulation Corporation) na simulação dos veículos [7]. Este software permite simular o comportamento dinâmico de veículos pesados, nomeadamente camiões, veículos articulados e autocarros. Adicionalmente permite considerar perfis de irregularidade reais, diferentes configurações de eixos, pneus e suspensões, assim como diferentes modelos de pneu, desde os mais simples (tabelas de dados) até aos mais complexos MF-Tyre e MF-Swift da TNO e FTire da COSIN, passando pela versão Pacejka 5.2 da Magic Formula. Pacejka [8] descreve todos os modelos.

### 2.5 Configurações

Foram considerados dois veículos, um veículo articulado de 2+3 eixos e um camião de 2 eixos, correspondendo, respetivamente, às classes H5 e F1 da classificação de veículos pesados da JAE e apresentados na Fig. 4. Para o veículo articulado foi considerado um peso bruto de 40 t e para o camião um peso bruto de 19 t.

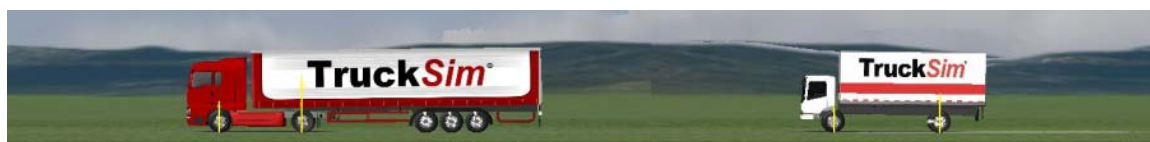


Fig. 4. Veículos considerados no estudo

De modo a simular o mais realisticamente as condições reais consideraram-se veículos inteiramente carregados, veículos não inteiramente carregados (em 10, 20 ou 30%), veículos sobrecarregados (em 10, 20 ou 30%) e veículos vazios.

### 3 RESPOSTA ESTRUTURAL DO PAVIMENTO

#### 3.1 Considerações gerais

Esta secção descreve os aspetos relacionados com a resposta estrutural do pavimento, nomeadamente as características dos materiais, as dimensões da área de contacto pneu-pavimento, a carga dinâmica e o método usado no cálculo da resposta estrutural.

#### 3.2 Características dos materiais

Foram consideradas duas estruturas de pavimento, uma delgada com 12 cm de camadas betuminosas e uma espessa com 28 cm de camadas betuminosas. Estas espessuras correspondem às classes de tráfego T6 e T1 do MACOPAV [9]. Assumiu-se o comportamento linear elástico, sendo apenas necessárias duas características dos materiais, módulo de deformabilidade e coeficiente de Poisson. Contudo, o efeito da velocidade e consequentemente o efeito do tempo de carregamento, foi considerado no cálculo do módulo de deformabilidade inicial pelo método da Shell [10]. A camada granular tem 20 cm de espessura e a fundação foi considerada como sendo infinita.

O Quadro 1 apresenta os parâmetros considerados no cálculo do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, os quais foram definidos de modo a ter, aproximadamente, a estrutura delgada com as características de uma camada de ligação (AC 20 bin - MBD) e a estrutura espessa com as características de uma camada de base (AC 20 base - MB). Uma vez que a percentagem volumétrica de betume influencia fortemente o desempenho à fadiga, foram definidos os valores de 12% e 9,5% para a estrutura delgada e para a estrutura espessa, respetivamente. O Quadro 2 apresenta o módulo de deformabilidade da mistura betuminosa nas diferentes situações e o Quadro 3 as restantes características dos materiais.

Quadro 1. Parâmetros considerados no cálculo do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa

	Estrutura delgada	Estrutura espessa
Massa volúmica dos agregados ( $\text{kg/m}^3$ )	2530	
Massa volúmica do betume ( $\text{kg/m}^3$ )	1030	
Percentagem de betume (%)	5,8	4,5
Porosidade (%)	3,5	5,0
Vazios na mistura do agregado (%)	15,5	14,5
Percentagem volumétrica de betume (%)	12,0	9,5
Tipo de betume	35/50	
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	
Velocidades (km/h)	40/60/80/100	

Quadro 2. Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa para diferentes velocidades de circulação

Velocidade (km/h)	Módulo de deformabilidade (MPa)	
	Estrutura delgada	Estrutura espessa
40	4470	5327
60	4942	5837
80	5306	6229
100	5606	6550

Quadro 3. Características dos materiais

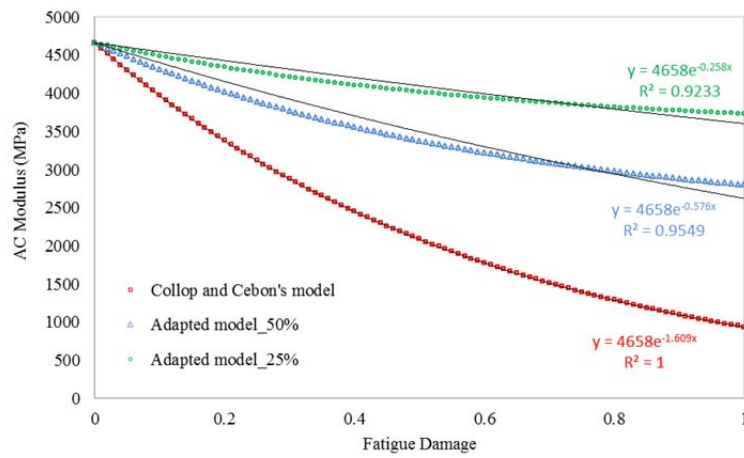
Camada	Módulo de deformabilidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
Betuminosa	Função da velocidade e da estrutura	0,35
Granular	200	0,30
Fundação	100	0,35

O módulo de deformabilidade da mistura betuminosa reduz-se ao longo da vida do pavimento. Assim sendo, considerou-se o modelo de degradação desenvolvido por Collop e Cebon [11]. Este modelo permite determinar a redução do módulo devido ao dano acumulado à fadiga como mostra a equação (2). Considerou-se  $(E/E_0)_c$  igual a 0,2 e consequentemente  $k=1,609$ .

$$\frac{E}{E_0} = e^{-kD} \quad D < 1 \quad (2)$$

$$\frac{E}{E_0} = \left( \frac{E}{E_0} \right)_c \quad D \geq 1$$

Para um melhor entendimento do efeito da degradação do módulo no dano ao longo da vida do pavimento, consideraram-se, para além do modelo desenvolvido por Collop e Cebon [11], mais dois modelos obtidos a partir deste mas conduzindo a menores redução do módulo. Por exemplo, se em determinado incremento de tempo o módulo reduz  $\Delta E$  segundo o modelo de Collop e Cebon, reduz 50% de  $\Delta E$  e 25% de  $\Delta E$  nos modelos adaptados, designados de 'Adapted model - 50%' and 'Adapted model - 25%', respectivamente (Fig. 5).



**Fig. 5. Definição dos modelos adaptados**

Os modelos adaptados foram extrapolados até ao módulo crítico obtendo-se as equações (3) e (4). A Fig. 6 mostra os três modelos considerados.

$$\frac{E}{E_0} = e^{-0.576D_{50\%}} \quad D_{50\%} < 1$$

$$\frac{E}{E_0} = \left( \frac{E}{E_0} \right)_c \quad D_{50\%} \geq 1$$

, where  $D_{50\%} = \frac{D}{2.80}$  (3)

$$\frac{E}{E_0} = e^{-0.258D_{25\%}} \quad D_{25\%} < 1$$

$$\frac{E}{E_0} = \left( \frac{E}{E_0} \right)_c \quad D_{25\%} \geq 1$$

, where  $D_{25\%} = \frac{D}{6.24}$  (4)

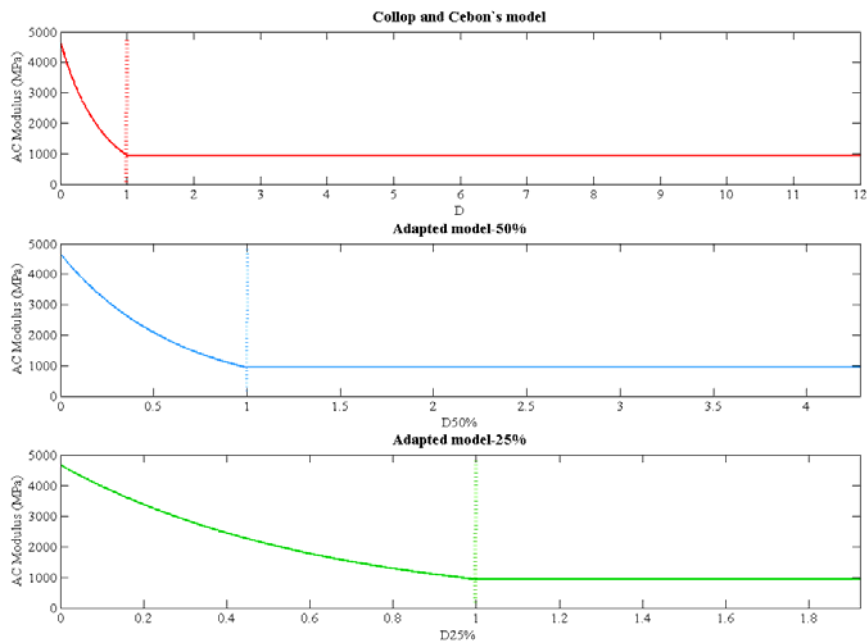


Fig. 6. Modelos de degradação do módulo de deformabilidade considerados

### 3.3 Contacto pneu-pavimento

O contacto pneu-pavimento é crucial para a avaliação da resposta estrutural do pavimento. Uma vez que o contacto depende da carga aplicada pelo pneu ao pavimento, foram considerados diferentes comprimentos para a área de contacto pneu-pavimento. O relatório da ação COST 334 apresenta valores para a área de contacto pneu-pavimento de diferentes pneus [12]. A Fig. 7 mostra os pneus que equipam os veículos considerados na análise e o Quadro 4 apresenta os valores para a área de contacto pneu-pavimento. A partir dos valores do Quadro 4 foram calculadas linhas de regressão e feitas extrapolações de modo a obter diferentes comprimentos para a área de contacto pneu-pavimento, os quais foram arredondados ao inteiro mais próximo. A largura da área de contacto foi considerada constante.

No caso do rodado duplo, os valores apresentados no Quadro 4 referem-se apenas a um dos rodados. Por exemplo, a largura do pneu 315/80R22,5 é de 49,4 cm ( $2 \times 24,7$ ) e a largura total é de 59,4 cm ( $2 \times 24,7 + 10$ ).



Fig. 7. Pneus que equipam os veículos

Quadro 4. Área de contacto pneu-pavimento (adaptado de [12])

Carga/eixo (t) →		6		7		8		9		10		11.5		13	
Pneu	Largura da AC (cm)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)	AC (cm <sup>2</sup> )	p (kPa)
318/80R22.5 (simples)	24,7	537	700	548	825	559	950								
318/80R22.5 (duplo)	24,7					467	550	475	625	482	700	488	825	500	925
385/65R22.5 (simples)	28,5			555	775	564	900	578	1000						
318/70R22.5 (simples)	25,3	502	800	504	950										
318/70R22.5 (duplo)	25,3					496	575	505	650	513	725	521	850		

### 3.4 Carga dinâmica

Atendendo ao conceito de repetibilidade espacial [2], que refere que os picos de carga aplicados por uma frota de veículos pesados estão concentrados em localizações específicas ao longo do pavimento originando maior dano nessas localizações, a resposta do pavimento foi calculada para a carga mais relevante (percentil 85%) de cada perfil.

### 3.5 Método dos elementos de fronteira

A ideia básica do Método dos Elementos de Fronteira (BEM) é proveniente de Trefftz [13], que sugeriu que, em contraste com o método de Ritz, apenas funções que satisfazem exatamente as equações diferenciais devem ser usadas para aproximar a solução dentro do domínio e, portanto, só existe necessidade de aproximar as condições de fronteira. Assim sendo, não é necessário subdividir o domínio em elementos. Essas soluções também satisfazem as condições no infinito, e, conseqüentemente, não há nenhum problema em lidar com domínios infinitos ou semi-infinitos. Para uma breve descrição das vantagens, desvantagens, formulação, implementação e aplicação do BEM ver [14], [15] e [16].

## 4 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O procedimento de cálculo foi implementado numa aplicação em Visual Basic 2010 Express. A Fig. 8 apresenta a interface desta aplicação. Este procedimento considera incrementos de tempo de um ano, e para cada incremento calcula o dano, o valor do IRI e o módulo de deformabilidade.



Fig. 8. Interface da aplicação

## 5 RESULTADOS

A aplicação criada possibilita um número variado de combinações e conseqüentemente de análises. A título de exemplo, considerou-se um caso de carga para a estrutura delgada (Fig. 9) e um caso de carga para a estrutura espessa (Fig. 10). A estrutura delgada é solicitada por um número de veículos pesados correspondentes à classe T6 do MACOPAV e a estrutura espessa é solicitada por um número de veículos pesados correspondentes à classe T1 do MACOPAV [9].



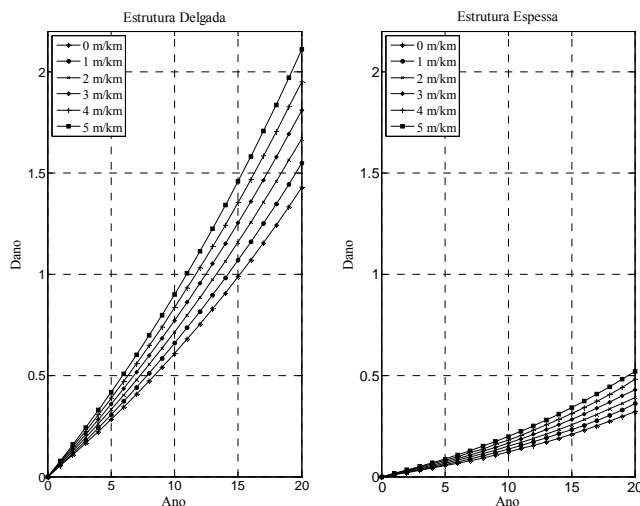
Fig. 9. Caso de carga da estrutura delgada



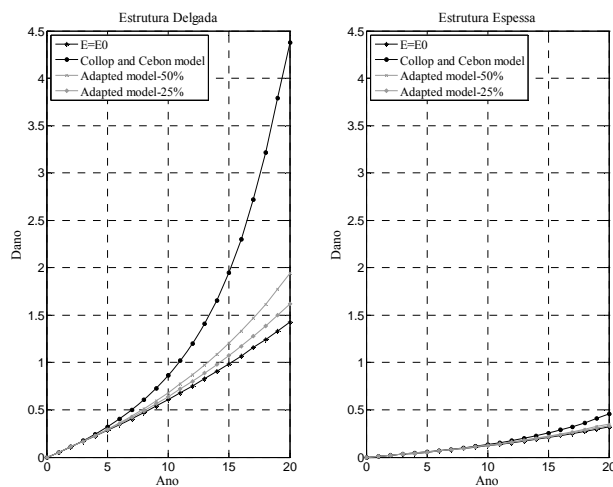
**Fig. 10. Caso de carga da estrutura espessa**

A Fig. 11 e a Fig. 12 mostram o efeito isolado de diferentes níveis de irregularidade longitudinal inicial (0, 1, 2, 3, 4 ou 5 m/km) e dos três modelos de degradação do módulo de deformabilidade, respectivamente, na evolução do dano da estrutura delgada e da estrutura espessa.

A Fig. 13 apresenta o efeito combinado de diferentes níveis de irregularidade inicial com a degradação do módulo de deformabilidade segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon. Por último, a Fig. 14 apresenta o efeito isolado da evolução da irregularidade e o efeito combinado com a redução do módulo de deformabilidade segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon.

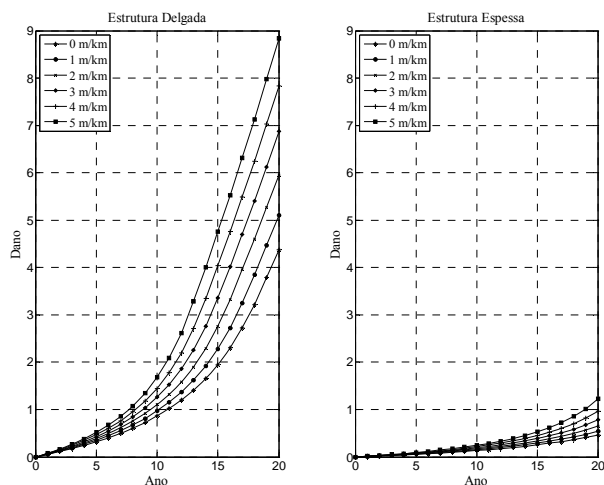


**Fig. 11. Efeito isolado de diferentes níveis de irregularidade inicial na evolução do dano**

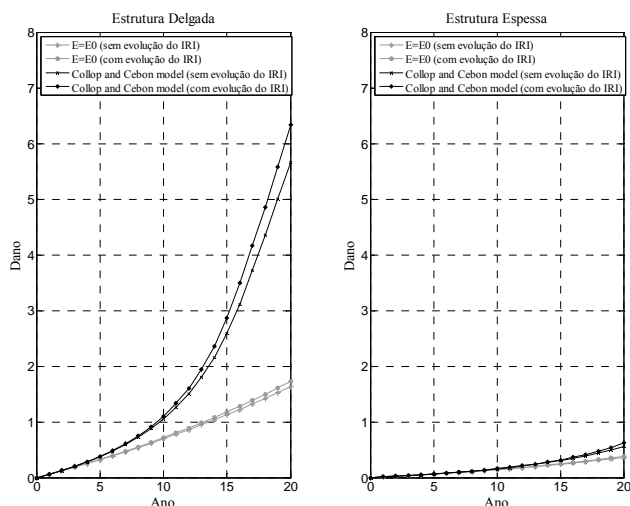


**Fig. 12. Efeito isolado dos três modelos de degradação do módulo de deformabilidade na evolução do dano (IRI=0 m/km)**





**Fig. 13. Efeito combinado de diferentes níveis de irregularidade inicial e da degradação do módulo de deformabilidade segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon**



**Fig. 14. Efeito isolado da evolução da irregularidade e combinado com a redução do módulo de deformabilidade segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon**

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados mostram claramente o efeito do nível de irregularidade longitudinal inicial no dano do pavimento e consequentemente na vida do pavimento. Esse efeito é mais pronunciado se se considerar a degradação do módulo de deformabilidade da mistura betuminosa.

No caso da estrutura delgada, a irregularidade inicial ao passar de 0 para 5 m/km, reduz a vida do pavimento em cerca de 4 anos e aumenta o dano em 48% (Fig. 11). A estrutura espessa apresenta danos inferiores. Trata-se de uma estrutura mais resistente que como tal foi sujeita a um tráfego mais agressivo, mas se se considerar a relação agressividade de tráfego versus espessura das camadas betuminosas, a estrutura delgada apresenta uma maior relação. Adicionalmente considerou-se uma velocidade mais elevada na estrutura espessa e consequentemente um maior módulo de deformabilidade. Todavia, a irregularidade inicial ao passar de 0 para 5 m/km aumenta o dano em 63% (Fig. 11).

O efeito isolado da degradação do módulo de deformabilidade aumenta drasticamente o dano da estrutura delgada (Fig. 12). A consideração da redução do módulo segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon aumenta o dano em 207%. Os modelos 'Adapted model-50%' e 'Adapted model-25%' conduzem, como expectável, a menores reduções, 36% e 13%, respetivamente. A estrutura delgada apresenta uma maior relação

agressividade de tráfego versus espessura das camadas betuminosas, o que conduz a um estado de tensão-deformação elevado aumentando o dano à fadiga e reduzindo o módulo de deformabilidade no incremento de tempo seguinte, o que por sua vez conduz a um estado de tensão-deformação mais elevado e assim sucessivamente.

O efeito combinado de diferentes níveis de irregularidade inicial com a degradação do módulo de deformabilidade segundo o modelo desenvolvido por Collop e Cebon conduz a aumentos de dano de 320% na estrutura delgada e de 135% na estrutura espessa (Fig. 13).

Por último, a evolução da irregularidade ao longo do período de dimensionamento conduz a aumentos de dano de 12% na estrutura delgada e de 9% na estrutura espessa (Fig. 14).

Torna-se assim, imprescindível a consideração destes aspetos no dimensionamento de modo a ter estruturas de pavimento mais duradoras e com menores custos de manutenção.

## 7 REFERÊNCIAS

1. Cebon, D. and Newland, D. E. (1983), *Vehicle System Dynamics*, vol. 12, n. 1, p. 160.
2. Cebon, D. (1999). *Handbook of Vehicle-Road Interaction*, Taylor & Francis.
3. MATLAB@ (2012). <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. 25 January 2012.
4. ISO 8608 (1995). *Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data*, International Organization for Standardization.
5. ProVAL@ (2011). <http://www.roadprofile.com/>.
6. Lang, J.M. (2001). *Prediction Model in Swedish PMS*. Proceedings of 5th International Conference on Managing Pavements.
7. TruckSim@ (2011). <http://www.carsim.com/products/trucksim/index.php>, Mechanical Simulation.
8. Pacejka, H.B. (2006). *Tyre and Vehicle Dynamics*, Second Edition ed. Elsevier.
9. MACOPAV (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. JAE (Junta Autónoma de Estradas).
10. Branco, F., Pereira, P. and Santos, L.P. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. ALMEDINA.
11. Collop, A.C. and Cebon, D. (1996). *Stiffness Reductions of Flexible Pavements due to Cumulative Fatigue Damage*. *Journal of Transportation Engineering* 122, 131-139.
12. COST 334 (2001). *Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres (Final report of the Action - version 29 November 2001 Taskgroup 3 Final Report)*, European Commission, Directorate General Transport.
13. Beer, G., Smith, I. and Duenser, C. (2008). *The Boundary Element Method with Programming - For Engineers and Scientists*. Springer Wien New York.
14. Almeida, A., Picado-Santos, L. (2010). In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Transport Infrastructures*, paper 160, on CD, S.Paulo-Brasil.
15. Almeida, A. e Picado-Santos, L. (2012). *Calculation of the Pavement Response to Dynamic Loads by the Boundary Element Method*. 4th European Pavement and Asset Management Conference, Malmö, Suécia.
16. Almeida, A. e Picado-Santos, L. (2012). *Pavement Response Excited by Road Unevennesses using the Boundary Element Method*. 7th International Conference on Cracking in Pavements, Delft, Holanda.