

# **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS EM PORTUGAL PELA METODOLOGIA EMPÍRICO-MECANICISTA SHELL E SUA COMPARAÇÃO COM A METODOLOGIA AASHTO'93**

João Afonso<sup>1</sup> e Sara Cardoso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mota-Engil Engenharia e Construção – Núcleo Técnico de Pavimentos, Rua do Rego Lameiro nº38, 4300-434 Porto, Portugal

Email: Joao.Afonso@mota-engil.pt

<sup>2</sup> Mota-Engil Engenharia e Construção – Núcleo Técnico de Pavimentos, Rua do Rego Lameiro nº 38, 4300-434 Porto, Portugal

---

## **Sumário**

*O presente estudo faz a avaliação da capacidade de carga de pavimentos novos (recém-executados) com base em dados de empreitadas de duas concessões rodoviárias em Portugal. Tem como principal objetivo comparar a metodologia de dimensionamento e avaliação de pavimentos AASHTO'93 com os habituais processos usados em Portugal utilizando o método empírico-mecanicista da SHELL, de forma a verificar se apresentam diferenças relevantes ou se chegam a resultados idênticos. O objetivo é aumentar o conhecimento em Portugal na utilização do primeiro método, que é a metodologia usual em muitos mercados para onde as empresas portuguesas se internacionalizaram.*

---

**Palavras-chave:** Falling Weight Deflectometer (FWD); capacidade de carga; retro-análise; SHELL; AASHTO'93.

## **1 INTRODUÇÃO**

No final das obras de domínio rodoviário é importante verificar a qualidade dos pavimentos executados. É habitualmente feita uma avaliação das características superficiais, de forma a assegurar os níveis de segurança e conforto para os seus utilizadores mas, além desta avaliação, em muitas empreitadas (sejam elas de construção nova ou de reabilitação profunda) é igualmente necessário/pertinente proceder a uma avaliação estrutural do pavimento, aferindo a sua capacidade de carga.

## **2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ESTRUTURAL**

A capacidade estrutural do conjunto pavimento-fundação (ou a capacidade de carga do pavimento), pode ser avaliada com base em parâmetros como: módulos de elasticidade dos materiais de cada camada, vida residual, espessura requerida para um novo período de vida, deformação vertical da superfície, etc. Todas estas análises têm habitualmente como ponto de partida a avaliação da resposta do pavimento quando é submetido à aplicação de uma carga em determinadas condições. O valor desta deformação é designado por deflexão [1].

### **Defletómetro de Impacto (*Falling Weight Deflectometer – FWD*)**

O presente estudo vai incidir sobre avaliações da capacidade estrutural de pavimentos efetuadas com base em deflexões medidas através do equipamento Defletómetro de Impacto (*FWD*). Por esta razão importa aprofundar o seu princípio de funcionamento. O Defletómetro de Impacto (*FWD*) é um equipamento para ensaios de carga não destrutivos, destinado a medir a resposta do pavimento quando solicitado por uma carga de impacto.

Cada medição individual é realizada através da queda de uma massa de uma determinada altura sobre os amortecedores, transmitindo uma força ao pavimento através de uma placa rígida. Simultaneamente, são medidos os vários deslocamentos verticais da superfície nos pontos de apoio dos acelerómetros (geofones).

### 3 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DO PAVIMENTO

#### 3.1 Enquadramento

Apresenta-se agora a avaliação da capacidade de carga de duas estruturas de pavimento recém-executadas, com base em dados recolhidos de empreitadas de duas concessões rodoviárias em Portugal.

O principal objetivo deste estudo é comparar a metodologia de dimensionamento e avaliação de pavimentos AASHTO'93 [2] com os habituais processos usados em Portugal. A metodologia da AASHTO'93 foi desenvolvida e é bastante comum nos Estados Unidos da América sendo igualmente utilizada frequentemente na maior parte dos países da América Latina.

As estruturas dos pavimentos em estudo apresentam-se nos Quadros 1 e 2. Daqui em diante serão denominadas Pavimento I e Pavimento II, respetivamente.

Quadro 1. Estrutura de pavimento I

Camada	Material	Espessura (m)	E (MPa)
Desgaste	AC 14 Surf 35/50 (BB)	0,05	5300
Ligação	AC 20 Bin 35/50 (MB)	0,09	6300
Base	ABGE	0,20	170
Fundação	-	-	80

Quadro 2. Estrutura de pavimento II

Camada	Material	Espessura (m)	E (MPa)
Desgaste	AC 10 Surf PMB 45/80-65 (mBBr)	0,03	3000
Ligação	AC 20 Bin 35/50 (MB)	0,07	6300
Base	AC 32 Base 35/50 (MB)	0,10	6700
Base	ABGE	0,20	300
Sub-Base	ABGE	0,15	150
Fundação	-	-	80

#### 3.2 Metodologia empírico-mecanicista da SHELL para o cálculo da capacidade estrutural de projeto

De forma a dar seguimento ao que foi descrito efetuou-se, em primeiro lugar, a verificação da capacidade estrutural das estruturas de pavimento apresentadas anteriormente através metodologia proposta pela SHELL.

##### Leis de ruína

Para verificação estrutural dos pavimentos, a metodologia empírico-mecanicista da Shell utiliza um critério de fadiga das misturas betuminosas e um critério de deformações permanentes ao nível da fundação. As equações que, respetivamente, traduzem as leis de ruína utilizadas são as seguintes [3]:

$$\epsilon_c = (0,856 \times V_B + 1,08) \times E^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (1)$$

$$\epsilon_c = 1,8 \times 10^{-2} \times N^{-0,25} \quad (2)$$

Nas equações anteriores,  $V_B$  (%) é a percentagem volumétrica de betume,  $E$  (Pa) representa o módulo de deformabilidade da camada e  $N$  representa o número de passagens de um eixo-padrão. A lei de ruína por fadiga é verificada através da extensão de tração na base das camadas betuminosas e a lei de ruína por deformações permanentes é verificada através da extensão de compressão no topo da fundação [3].

Para efeito de cálculo do estado de tensão/deformação das estruturas de pavimento definidas, com o objetivo de se saber qual a respetiva extensão atuante (de tração na base das camadas betuminosas e de compressão no topo da fundação), utilizou-se um *software* próprio para o efeito, nomeadamente o ALIZE. A solitação foi modelada através de um eixo padrão de 130 kN.

No Quadro 3 é possível observar que a estrutura de pavimento I apresenta uma capacidade de carga de  $0,436 \times 10^6$  eixos-padrão de 130 kN e no Quadro 4 é possível observar que a estrutura de pavimento II apresenta uma capacidade de carga de  $4,32 \times 10^6$  eixos-padrão de 130 kN. Assim, utilizam-se no presente estudo duas estruturas de pavimento com capacidades de carga bastante distintas.

Quadro 3. Capacidade de carga de projeto do pavimento I

Material	Espessura (m)	E (MPa)	Extensão ( $\times 10^{-6}$ )	$N_{adm}$ ( $\times 10^6$ ) 130 kN
AC 14 Surf 35/50	0,05	5300	$\varepsilon_c=213$	0,436
AC 20 Bin 35/50	0,09	6300		
ABGE	0,20	170	$\varepsilon_t=648$	0,595
Fundação	-	80		

Quadro 4. Capacidade de carga de projeto do pavimento II

Material	Espessura (m)	E (MPa)	Extensão ( $\times 10^{-6}$ )	$N_{adm}$ ( $\times 10^6$ ) 130 kN
AC 10 Surf PMB 45/80-65	0,03	3000	$\varepsilon_c=120$	4,32
AC 20 Bin 35/50	0,07	6300		
AC 32 Base 35/50	0,10	6700		
ABGE	0,20	300	$\varepsilon_t=315$	10,72
ABGE	0,15	150		
Fundação	-	80		

### 3.3 Metodologia AASHTO'93 para o cálculo da capacidade de carga de projeto

O elemento básico da metodologia AASHTO'93 para o dimensionamento de pavimentos flexíveis é o número estrutural ( $SN$  – *Structural Number*), capaz de exprimir a resistência estrutural do pavimento [2]. De acordo com a metodologia, foi calculado o  $SN$  de projeto das estruturas em análise multiplicando a espessura de cada uma das camadas pelo coeficiente estrutural correspondente. Admitiu-se um coeficiente de drenagem de 1,0 para as camadas granulares.

Quadro 5. Cálculo  $SN$  de projeto do pavimento I

Material	Espessura (pol)	E (Psi)	Coef. Estrutural	$SN$ Projeto
AC 14 Surf 35/50	1,97	768700	0,44	3,53
AC 20 Bin 35/50	3,54	913738	0,44	
ABGE	7,87	24656	0,14	
-	-	11603	-	

Quadro 6. Cálculo SN de projeto do pavimento II

Material	Espessura (pol)	E (Psi)	Coef. Estrutural	SN Projeto
AC 10 Surf PMB 45/80-65	1,18	435113	0,22	5,13
AC 20 Bin 35/50	2,76	913738	0,44	
AC 32 Base 35/50	3,94	971753	0,44	
ABGE	7,87	434511	0,14	
ABGE	5,91	21756	0,14	
Fundação	-	11603	-	

Posteriormente foi determinada a capacidade de carga do pavimento em termos de número de aplicações de carga ( $W_{18}$  – eixos de 18 kips - 8,2 ton/80kN) de acordo com a expressão (3), enunciada no manual da AASHTO [2]. Foi utilizado um nível de confiança de 90% ( $Z_R = 1,282$ ), um desvio padrão de 0,45 ( $S_0$ ) e índices de desempenho inicial ( $PSI_{inicial}$ ) e final ( $PSI_{final}$ ) de 4,2 e 2,5, respectivamente.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \times S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07 \quad (3)$$

Obteve-se, desta forma, para o pavimento I uma capacidade de carga de  $3,03 \times 10^6$  eixos-padrão de 80 kN, o que corresponde a  $0,435 \times 10^6$  eixos-padrão de 130 kN. Para o pavimento II obteve-se uma capacidade de carga de  $34,93 \times 10^6$  eixos-padrão de 80 kN, o que corresponde a  $5,01 \times 10^6$  eixos-padrão de 130 kN. As conversões de tipologia de eixos-padrão foram feitas de acordo com a denominada lei da potência quarta<sup>1</sup>.

É importante referir que o nível de confiança de 90% aqui utilizado foi aquele que permitiu obter resultados mais próximos dos apresentados nos cálculos efetuados pelo método da SHELL.

### 3.4 Avaliação da capacidade de carga com o Defletómetro de Impacto (FWD)

Conforme já foi dito, a capacidade estrutural do conjunto pavimento/fundação pode ser avaliada em função das deflexões registadas quando o pavimento é submetido a um determinado carregamento.

Para a elaboração do presente estudo foram considerados ensaios com o Defletómetro de Impacto tendo estes sido realizados ao longo da plena via, no alinhamento do rodado direito de cada sentido de circulação, espaçados de 100 m em 100 m.

Em cada ponto ensaiado com o Defletómetro de Impacto foi efetuado um impacto inicial com o objetivo de ajustar a placa de carga à superfície do pavimento e um segundo impacto com o objetivo de efetuar a medição das deflexões. A força aplicada na superfície do pavimento foi de 65 kN através de uma placa de carga de 0,30 m de diâmetro. As distâncias utilizadas para os geofones (em relação ao centro da placa) estão apresentadas abaixo.

Quadro 7. Distâncias dos geofones

d1 (m)	d2 (m)	d3 (m)	d4 (m)	d5 (m)	d6 (m)	d7 (m)	d8 (m)	d9 (m)
0	0,3	0,45	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1

<sup>1</sup>  $N_{130kN} = N_{80kN} \times \left( \frac{80}{130} \right)^4$

Em cada ponto de ensaio é medida a temperatura atmosférica e da superfície do pavimento e registada a hora do ensaio, de modo a ser possível corrigir os resultados obtidos para as temperaturas padronizadas para cada análise.

Para se obter uma comparação direta da resposta dos diferentes pontos ensaiados é também necessário proceder a uma normalização para a força padrão utilizada nos ensaios de 65 kN, uma vez que, de ponto para ponto, se verificam ligeiras variações da força de pico aplicada.

Após a normalização dos valores de deflexão é habitual identificarem-se valores pontuais que podem ser considerados como “não representativos” e, por esse motivo, são desprezados da caracterização do pavimento. É de referir que os pontos excluídos correspondem a pontos cujas deflexões medidas são anormalmente “altas” ou “baixas” comparativamente com o conjunto de todas as deflexões medidas. Como critério de exclusão faz-se a determinação do percentil 95% ( $P_{95\%}$ ) e do percentil 5% ( $P_{5\%}$ ) das deflexões ( $\mu\text{m}$ ) medidas no sensor localizado no centro da placa de carga ( $d_1$ ) e rejeitam-se os pontos cujo valor seja superior ao  $P_{95\%}$  e inferior ao  $P_{5\%}$ . Em função do valor médio das deflexões ( $M$ ) e do desvio padrão ( $\sigma$ ) os percentis das deflexões são calculados através da seguinte expressão:

$$D^{5\%.95\%} = M \pm 1,645 \times \sigma \quad (4)$$

### 3.5 Retro-análise e avaliação estrutural baseada na metodologia da SHELL

Nesta secção apresenta-se a metodologia e os resultados do processo de retro-análise baseado na metodologia empírico-mecanicista da SHELL, usualmente utilizado em Portugal.

#### Análise das deflexões

Posteriormente à normalização das deflexões descrita no Capítulo 3.4, procurou-se identificar zonas homogéneas em termos de deflexões. A homogeneidade dos troços é verificada através do coeficiente de variação (COV), que se obtém da divisão do desvio padrão das deflexões normalizadas ( $\sigma$ ) pelo valor médio das deflexões normalizadas ( $M$ ):

$$COV = \frac{\sigma}{M} \times 100\% \quad (5)$$

É de referir que para valores de covariância abaixo de 20% tem-se uma boa homogeneidade, para valores de 20% a 30% tem-se uma homogeneidade média e para valores acima dos 30% a homogeneidade é considerada fraca. No presente estudo constatou-se que as zonas estudadas apresentavam adequada homogeneidade ( $COV < 30\%$ ).

#### Metodologia de Retro-análise

Com o objetivo de determinar por retro-análise os módulos de deformabilidade das camadas constituintes dos pavimentos, é selecionado, para cada uma das zonas consideradas homogéneas, o ponto cujo comportamento estrutural se considerou representativo do pavimento em estudo. Os pontos selecionados são aqueles cujas deflexões ( $\mu\text{m}$ ) medidas no ensaio de carga com o Defletómetro de Impacto se aproximam do valor  $D^{85}$ , correspondente ao percentil 85% do conjunto das deflexões medidas em toda a zona homogénea. Através do valor médio das deflexões ( $M$ ) e do respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ) tem-se:

$$D^{85\%} = M + 1,036 \times \sigma \quad (6)$$

A escolha do ponto representativo deve ter em conta o parâmetro RMS (raiz quadrada da média ao quadrado das diferenças entre as deflexões do ponto escolhido e as do percentil 85%) e ainda a aproximação do valor da deflexão medida no geofone colocado no centro da placa.

#### Estimativa das características mecânicas

As características de deformabilidade das diferentes camadas dos pavimentos em estudo podem ser estimadas utilizando o processo de retro-análise dos resultados obtidos nos ensaios de carga.

Com base na análise estrutural de pavimentos, que se admite serem constituídos por camadas homogêneas, isotrópicas e com um comportamento elástico linear, e uma vez definidas as espessuras de cada uma delas, recorre-se a iterativamente a *software* de cálculo para determinar, para cada zona de comportamento estrutural homogêneo (utilizando como ponto de ensaio representativo o mais próximo do percentil 85%), o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que conduz a deflexões “calculadas” semelhantes às deflexões “medidas” no ensaio de carga.

Tendo em vista esta interpretação dos resultados dos ensaios é necessário conhecer:

- i. a litologia da fundação, a natureza e espessuras das camadas do pavimento;
- ii. as características dos materiais constituintes das várias camadas;
- iii. as temperaturas de projeto;
- iv. a configuração do equipamento de ensaio (raio da placa de carga, amplitude da carga aplicada, posição dos geofones durante os ensaios).

Nos Quadros 8 e 9 apresentam-se os valores dos módulos de deformabilidade para as camadas constituintes dos pavimentos em estudo, obtidos a partir do referido processo de retro-análise.

Quadro 8. Módulos de deformabilidade obtidos para as camadas do pavimento I

Sentido	Zona	Espessuras (cm)			E (MPa)		
		BB	MB	ABGE	MB's	ABGE	Fundação
Crescente	1	5	9	20	6600	190	90
	2	5	9	20	6800	340	140
Decrescente	1	5	9	20	6700	290	120
	2	5	9	20	6400	300	130
	3	5	9	20	6400	220	100

Quadro 9. Módulos de deformabilidade obtidos para as camadas do pavimento II

Sentido	Zona	Espessuras (cm)		E (MPa)		
		MB's	ABGE	MB's	ABGE	Fundação
Crescente	1	3 / 7 / 10	20 / 15	3381 / 5786 / 6052	300/150	80
	2	3 / 7 / 10	20 / 15	2766 / 5482 / 5870	350/200	80
Decrescente	1	3 / 7 / 10	20 / 15	3102 / 5876 / 6095	350/200	85
	2	3 / 7 / 10	20 / 15	3024 / 5644 / 6018	250/150	85
	3	3 / 7 / 10	20 / 15	3490 / 5876 / 6095	350/250	80

### Avaliação da capacidade estrutural

Para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos, foi utilizada a metodologia empírico-mecanicista da SHELL, descrita anteriormente no Capítulo 3.2, considerando os módulos de deformabilidade obtidos do processo de retro-análise. No Quadro 10 seguem os resultados do cálculo da capacidade de carga para as zonas em estudo referentes ao pavimento I. De acordo com os mesmos, é possível verificar que o pavimento recém-executado apresenta capacidade de carga superior ao previsto em projeto.

Quadro 10. Capacidade de carga do pavimento I

Sentido	Zona	E (MPa)			Misturas Betuminosas		Fundação	
		MB	ABGE	Fundação	Ext. (x10 <sup>-6</sup> )	N <sub>adm</sub> (x10 <sup>6</sup> )	Ext. (x10 <sup>-6</sup> )	N <sub>adm</sub> (x10 <sup>6</sup> )
Crescente	1	6600	190	90	183,4	0,85	554,4	1,11
	2	6800	340	140	145,6	2,55	411,3	3,67
Decrescente	1	6700	290	120	157,1	1,79	457,9	2,39
	2	6400	300	130	157,8	1,90	442,3	2,74
	3	6400	220	100	177,9	1,04	525,1	1,38

No Quadro 11, por sua vez, seguem os resultados da capacidade de carga para as zonas em estudo referentes ao pavimento II. De acordo com os mesmos, também aqui é possível verificar que o pavimento recém-executado apresenta capacidade de carga superior ao que tinha sido previsto em projeto.

Quadro 11. Capacidade de carga do pavimento II

Sentido	Zona	E (MPa)			Misturas Betuminosas		Fundação	
		MB	ABGE	Fundação	Ext. (x10 <sup>-6</sup> )	N <sub>adm</sub> (x10 <sup>7</sup> )	Ext. (x10 <sup>-6</sup> )	N <sub>adm</sub> (x10 <sup>6</sup> )
Crescente	1	3381 / 5786 / 6052	300/150	80	125,4	0,53	319,7	10,0
	2	2766 / 5482 / 5870	350/200	80	121,2	2,56	322,9	9,7
Decrescente	1	3102 / 5876 / 6095	350/200	85	117,4	2,45	305,5	12,1
	2	3024 / 5644 / 6018	250/150	85	131,5	1,45	315,8	10,6
	3	3490 / 5876 / 6095	350/250	80	115,4	2,16	308,6	11,6

### 3.6 Retro-análise e avaliação da capacidade de carga baseada na metodologia AASHTO'93

Apresentam-se agora os resultados do processo de retro-análise com base na metodologia AASHTO'93.

#### Análise das deflexões

O tratamento inicial das deflexões medidas foi feito de acordo com o descrito no Capítulo 3.4, contemplando a necessidade de se fazer uma normalização da carga aplicada e de se corrigir a deflexão medida no centro da placa para uma temperatura de cálculo de 20°C (o especificado na metodologia AASHTO'93) [2].

#### Metodologia de Retro-análise

A metodologia da AASHTO engloba a determinação de variáveis como o módulo resiliente da fundação ( $M_R$ ), o módulo equivalente da estrutura do pavimento ( $E_p$ ) e o número estrutural efetivo ( $SN_{eff}$ ) [2].

#### Módulo resiliente da fundação ( $M_R$ )

De acordo com o manual da AASHTO o módulo resiliente da fundação ( $M_R$ ) é determinado através das deflexões medidas, pela seguinte expressão [2]:

$$M_r = \frac{0,24 \times P}{d_r \times r} \quad (7)$$

A metodologia AASHTO'93 indica também que este valor deve ser multiplicado por um fator de 0,33 para que os valores assim obtidos (por retroanálise) sejam consistentes com os valores que seriam obtidos mediante ensaios de determinação do módulo resiliente em laboratório, já que foram estes os utilizados no *AASHTO Road*

Test e que originaram o desenvolvimento da equação de dimensionamento de pavimentos flexíveis. O valor de 0,33 foi determinado tendo em consideração as condições existentes no *AASHTO Road Test*: uma carga de aproximadamente 40 kN (9000 lb) nos ensaios *FWD* e a existência solos de fundação silto-argiloso (A-6) [2]. Na equação 7, P (kN) corresponde à carga aplicada,  $d_r$  ( $\mu\text{m}$ ) corresponde à deflexão medida a um raio r da placa de carga e r (m) corresponde à distância ao centro da placa de carga. É ainda de referir que  $M_R$  é obtido em Psi.

#### Módulo equivalente do pavimento ( $E_p$ )

O módulo equivalente do pavimento ( $E_p$ ) reflete a capacidade estrutural do pavimento como um todo, sendo determinado, de acordo com a metodologia AASHTO '93, através da seguinte expressão [2]:

$$d_0 = 1,5 \times p \times a \times \left[ \frac{1}{M_r \times \left( \frac{D \times \overline{E_p}}{a^3 \times M_r} \right)^2} + \left[ \frac{1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{D}{a} \right)^2}}{E_p} \right] \right] \quad (8)$$

Salienta-se que  $d_0$  ( $\mu\text{m}$ ) corresponde à deflexão central, p (Psi) à pressão da placa de carga, a (cm) corresponde ao raio da placa de carga e D (cm) à espessura total das camadas do pavimento acima da fundação.  $M_R$  (Psi) corresponde ao módulo resiliente da fundação definido anteriormente e  $E_p$  (Psi) corresponde então ao módulo equivalente efetivo do pavimento.

#### Número estrutural efetivo ( $SN_{\text{eff}}$ )

Conforme já foi referido, a variável com maior relevância para a avaliação da capacidade de carga dos pavimentos é o Número Estrutural (SN). O número estrutural efetivo existente ( $SN_{\text{eff}}$ ) é determinado através da espessura total da do pavimento (cm) e do módulo equivalente do pavimento ( $\text{Kg/cm}^2$ ) através seguinte expressão [2]:

$$SN_{\text{eff}} = 0,0045 \times D^3 \times \overline{E_p} \quad (9)$$

#### Estimativa das características mecânicas

Nos Quadros 12 e 13 apresenta-se a média aritmética do  $SN_{\text{eff}}$  para cada zona homogénea (para que os resultados sejam diretamente comparáveis, as zonas homogéneas utilizadas foram as mesmas da avaliação pelo método empírico-mecanicista da Shell – ponto 3.5) bem como os correspondentes módulos de deformabilidade equivalente do pavimento ( $E_p$ ) e de fundação ( $M_R$ ) dos pavimentos em estudo.

Quadro 12. Cálculo dos valores médios de  $E_p$ ,  $M_R$  e  $SN_{\text{eff}}$  para cada zona homogénea (pavimento I)

Sentido	Zona	$E_p$ (MPa)	$M_R$ (MPa)	$SN_{\text{eff}}$
Crescente	1	1485	46	3,58
	2	1943	62	3,92
Decrescente	1	2107	84	4,02
	2	1953	60	3,94
	3	1746	39	3,80

Quadro 13. Cálculo dos valores médios de  $E_p$ ,  $M_R$  e  $SN_{\text{eff}}$  para cada zona homogénea (pavimento II)

Sentido	Zona	$E_p$ (MPa)	$M_R$ (MPa)	$SN_{\text{eff}}$
Crescente	1	1722	43	6,11
	2	1434	37	5,75
Decrescente	1	1643	42	6,01
	2	1262	36	5,51
	3	1663	47	6,04



Optou-se por determinar o valor médio por zona homogênea (em detrimento de, por exemplo, o percentil 85%) pois o método AASHTO'93 considera o "nível de confiança" como uma variável tratada à parte, razão pela qual se devem considerar valores médios para não introduzir um excessivo grau de conservadorismo.

Da análise dos quadros anteriores é possível constatar que pelo método da AASHTO'93, o SN obtido através do processo de retro-análise dos pavimentos recém-executados é superior ao SN de projeto dos pavimentos das estruturas preconizadas em projeto.

#### Avaliação da capacidade estrutural

Para a avaliação da capacidade estrutural dos pavimentos, foi utilizada a metodologia AASHTO'93 enunciada anteriormente no Capítulo 3.3, conjuntamente com os resultados obtidos nos processos de retro-análise. No Quadro 14 apresentam-se os resultados referentes ao pavimento I. De acordo com os mesmos, é possível verificar que todas as zonas apresentam capacidade de carga superior à prevista em projeto ( $0,435 \times 10^6$  eixos-padrão) com exceção da primeira zona do sentido crescente e a correspondente zona do sentido decrescente que apresentam capacidade de carga de, respectivamente,  $0,131 \times 10^6$  e  $0,130 \times 10^6$  eixos-padrão.

Quadro 14. Capacidade de carga do pavimento I

Sentido	Zona	$E_p$ (MPa)	$M_R$ (MPa)	$M_R$ (Psi)	SN (Média)	$N_{adm130}$ ( $\times 10^6$ )
Crescente	1	1485	46	6672	3,58	0,131
	2	1943	62	8992	3,92	0,461
Decrescente	1	2107	84	12183	4,02	0,109
	2	1953	60	8702	3,94	0,442
	3	1746	39	5656	3,80	0,130

Os resultados assim obtidos não estão concordantes com os obtidos pela metodologia empírico-mecanicista da Shell, em que todas as zonas apresentavam uma capacidade de carga superior à da estrutura de projeto.

No Quadro 15 apresentam-se os resultados das zonas referentes ao pavimento II. De acordo com os mesmos, é possível verificar que todas as zonas apresentam capacidade de carga inferior à prevista em projeto.

Quadro 15. Capacidade de carga do pavimento II

Sentido	Zona	$E_p$ (Mpa)	$M_R$ (Mpa)	$M_R$ (Psi)	SN (Média)	$N_{adm130}$ ( $\times 10^6$ )
Crescente	1	1722	43	6237	6,11	4,29
	2	1434	37	5366	5,75	1,92
Decrescente	1	1643	42	6092	6,01	3,58
	2	1262	36	5221	5,51	1,31
	3	1663	47	6817	6,04	4,83

Também aqui os resultados não estão concordantes com os obtidos pela metodologia empírico-mecanicista da Shell, em que todas as zonas apresentavam uma capacidade de carga superior à da estrutura de projeto.

## 4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos ao longo deste estudo foi possível tirar as seguintes conclusões:

1. As capacidades de carga calculadas para as estruturas preconizadas em projeto apresentam resultados bastante próximos em ambos os métodos, utilizando um nível de confiança de 90% para o método da AASHTO'93 e assumindo o mesmo valor para módulo de elasticidade/ resiliente da fundação;

- Os pavimentos recém-executados, avaliados através de retroanálise e pela metodologia empírico-mecanicista da SHELL apresentam em todas as zonas dos dois casos de estudo uma capacidade estrutural superior ao preconizado em projeto;
- A capacidade estrutural dos pavimentos recém-executados, calculada de acordo com a metodologia de retro-análise AASHTO'93, não se mostrou, em todas as zonas, superior à capacidade de carga de projeto calculada através do mesmo método.

Dos pontos 2 e 3 é possível concluir que a avaliação de pavimentos executados pela metodologia da AASHTO'93 não chegou a conclusões idênticas à do método de referência em Portugal. Analisando os resultados obtidos, a causa provavelmente residirá no fator de correção de 0,33 para o módulo resiliente da fundação ( $M_R$ ) indicado pelo manual AASHTO'93, que será demasiado baixo para as condições habituais em Portugal ( $FWD$  com carga de 65 kN e solos de fundação/leito do pavimento com boa qualidade).

Uma vez que a metodologia de referência utilizada em Portugal é a metodologia empírico-mecanicista da SHELL, replicou-se novamente o cálculo da capacidade de carga pelo método da AASHTO'93 mas utilizando agora para módulos de fundação os obtidos através do processo de retro-análise pelo método da Shell.

Quadro 16. Capacidade de carga do pavimento I

Sentido	Zona	$E_p$ (Mpa)	$E_{fund}$ (Mpa)	$M_R$ (Psi)	SN (Média)	$N_{adm130}$ ( $\times 10^6$ )
Crescente	1	1485	90	13053	3,58	0,62
	2	1943	140	20305	3,92	3,06
Decrescente	1	2107	120	17405	4,02	2,51
	2	1953	130	18855	3,94	2,66
	3	1746	100	14504	3,80	1,15

Quadro 17. Capacidade de carga do pavimento II

Sentido	Zona	$E_p$ (Mpa)	$E_{fund}$ (Mpa)	$M_R$ (Psi)	SN (Média)	$N_{adm130}$ ( $\times 10^6$ )
Crescente	1	1722	80	11603	6,11	18,1
	2	1434	80	11603	5,75	11,5
Decrescente	1	1643	85	12328	6,01	18,4
	2	1262	85	12328	5,51	9,70
	3	1663	80	11603	6,04	16,6

Através dos resultados apresentados, nos Quadros 16 e 17, para os dois pavimentos em estudo é possível concluir que a capacidade de carga agora determinada está em linha com os valores obtidos no processo de retro-análise pela metodologia empírico-mecanicista da SHELL. O fator de correção do módulo resiliente de 0,33 será, de facto, muito conservador – no presente caso, para se obterem módulos da fundação semelhantes aos obtidos pela metodologia empírico-mecanicista da SHELL o coeficiente deveria andar entre 0,47 e 0,86.

## 5 REFERÊNCIAS

- Branco, F., Pereira, P., Santos, L., Pavimentos Rodoviários. Almedina, Coimbra, 2008.
- AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide for Design of Pavement Structures Washington, 2001.
- SHELL. Shell pavement design manual. Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.