

# MODELO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE AGRESSIVIDADE DO TRÁFEGO

Jorge Pais<sup>1</sup>, Paulo Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Tel: + 351 253 510 200, e-mail: jpais@civil.uminho.pt

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Tel: + 351 253 510 200, e-mail: ppereira@civil.uminho.pt

---

## Sumário

*Os principais métodos de dimensionamento de pavimentos utilizam o tráfego de projeto, baseado na transformação do espectro de tráfego, para o cálculo de um número equivalente de passagens de um eixo-padrão utilizando fatores de equivalência de carga dos eixos. Este artigo apresenta os resultados do desenvolvimento de um modelo para o cálculo do fator de agressividade das cargas do tráfego considerando o tipo de eixo, o tipo de roda e a constituição do pavimento. O modelo foi desenvolvido baseado na extensão horizontal de tração na base da camada betuminosa, a qual é responsável pelo aparecimento de fendilhamento, tendo sido considerado como o principal mecanismo de degradação dos pavimentos flexíveis.*

---

**Palavras-chave:** Dimensionamento de pavimentos; Agressividade do tráfego.

## 1 INTRODUÇÃO

O tráfego constitui o principal elemento para a análise e dimensionamento de pavimentos rodoviários, sendo habitualmente expresso em termos de número equivalente de eixos-padrão, conceito utilizado desde o AASHTO Design Guide (AASHTO, 1993). Este conceito continua a ser utilizado em vários métodos de dimensionamento apesar do Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide ter introduzido o conceito de espectro de cargas.

A quantificação do número equivalente de eixos-padrão utiliza o conceito de fator de agressividade o qual é definido pelo quociente entre o dano causado pela passagem de um eixo num pavimento e o dano causado pela passagem do eixo-padrão sobre o mesmo pavimento.

Utilizando a metodologia mecânica, o fator de agressividade (F) é obtido pelo quociente entre a vida do pavimento para o eixo-padrão ( $N_{80}$ ) e a vida do pavimento para a carga em análise ( $N_x$ ), de acordo com a Equação 1.

$$F = \frac{N_{80}}{N_x} \quad (1)$$

Considerando que a vida de um pavimento está relacionada principalmente com a sua resistência ao fendilhamento, esta pode ser expressa em função da rigidez das camadas betuminosas e da extensão de tração no fundo dessas camadas, tal como expresso na Equação 2, em que N é a vida do pavimento, E é o módulo de rigidez da mistura betuminosa,  $\epsilon$  é a extensão no fundo da camada betuminosa e a e b são constantes determinadas experimentalmente.

$$N = a.E^{-b}.\epsilon^{-c} \quad (2)$$

A substituição da Equação 2 na Equação 1 conduz à Equação 3 em que o fator de agressividade é relacionado com a extensão de tração para o eixo em análise ( $\varepsilon_x$ ) e a extensão de tração para o eixo-padrão ( $\varepsilon_{80}$ ). Esta equação é utilizada para calcular o fator de agressividade para qualquer pavimento e para qualquer tipo de eixo ou rodado considerando com critério de ruína o fendilhamento do pavimento.

$$F = \left( \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{80}} \right)^c \quad (3)$$

Considerando o comportamento elástico linear dos materiais do pavimento, a extensão de tração no fundo das camadas betuminosas do pavimento é proporcional à carga aplicada e neste caso a Equação 3 pode ser reescrita na forma da Equação 4, a qual é a habitual expressão para a conversão de determinada carga de um eixo em carga equivalente do eixo-padrão, sendo  $P_x$  a carga do eixo a converter e  $P_{80}$  a carga do eixo-padrão. Esta expressão é também conhecida como a lei da quarta potência quando ao coeficiente  $c$  é atribuído o valor de 4 resultante dos ensaios AASHTO (1962).

$$F = \left( \frac{P_x}{P_{80}} \right)^c \quad (4)$$

O efeito da sobreposição das cargas dos eixos, no caso dos eixos duplos e triplos é considerada afetando a Equação 4 por um coeficiente  $k$  função do tipo de eixo, de acordo com a Equação 5, como acontece no caso do Manual Francês de Dimensionamento de Pavimento (LCPC, 1994), o qual é função do tipo de eixo, apresentado os valores indicados no Quadro 1.

$$F = k \left( \frac{P_x}{P_{80}} \right)^c \quad (5)$$

Quadro 1. Valores do coeficiente  $k$  a  $c$  de acordo com a Equação 5 para o método francês (LCPC, 1994)

	c	k		
		Eixo simples	Eixo duplo	Eixo triplo
Pavimentos flexíveis	5	1	0.75	1.1
Pavimentos rígidos e semi-rígidos	12	1	12	113

Com base na literatura, os métodos e modelos desenvolvidos para calcular o fator de agressividade falham ao não considerar o tipo de pneu, pois a classificação dos veículos, pelos sistemas manuais ou automáticos, identificam apenas o tipo de eixo. No entanto, o número de pneus (1 ou 2: simples ou duplo) é extremamente importante para uma correta avaliação do fator de agressividade. Além disso, a constituição do pavimento não é identificada nos modelos utilizados para calcular o fator de agressividade devido à grande variabilidade de estruturas de pavimentos.

Deste modo, este trabalho pretende desenvolver um modelo para o cálculo do fator de agressividade considerando o tipo de roda, ou seja, simples ou dupla, válido para pavimentos flexíveis compostos por 2 camadas (uma camada de misturas betuminosas e uma camada granular), camadas estas definidas pela espessura e rigidez. A fundação do pavimento é definida apenas pela sua rigidez. O modelo foi desenvolvido utilizando os resultados da simulação de diferentes estruturas de pavimento, assumindo valores diferentes para a espessura e a rigidez das camadas do pavimento. Além disso, foi desenvolvida uma rede neuronal artificial para calcular os fatores de agressividade.

## 2 CASOS DE ESTUDO

Neste estudo desenvolveu-se um modelo para o cálculo do fator de agressividade das cargas do tráfego, definindo o coeficiente  $k$  da Equação 5 através da modelação de um pavimento com uma camada betuminosa e uma camada granular. No total 900 diferentes pavimentos foram modelados, com diferentes valores para a espessura e a rigidez das camadas. A espessura da camada betuminosa foi definida para valores de 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, e 0,30 m. A rigidez camada betuminosa foi definida para valores de 2500, 5000, 7500, 10000 e 12500 MPa. A espessura da camada granular foi ajustada para 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, e 0,30 m, e a sua rigidez foi o dobro da rigidez da fundação. A fundação do pavimento foi modelada para 20, 40, 60, 80, 100, e 120 MPa de módulo de rigidez. Quanto ao coeficiente de Poisson, foram considerados os seguintes valores: 0,35 para a camada betuminosa, 0,40 para a camada granular e de 0,45 para a fundação. O fatorial completo dos casos apresentados leva a 900 diferentes pavimentos que foram considerados nesta análise. Este fatorial permite a inclusão de todas as configurações de pavimento típicos existentes em estradas.

A simulação foi realizada para eixo simples, duplo e triplo, com rodas simples e duplas. A carga foi modelada através de uma área circular com um raio de 0,125 m, que é um valor típico utilizado na conceção de pavimentos. Para rodas duplas, a distância entre os centros das rodas foi definida como três vezes o seu raio, ou seja, 0,375 m. Para eixos múltiplos (eixos duplos e triplos), a distância entre eixos foi definida como 1,35 m, um valor típico para a distância entre eixos em várias configurações de veículos pesados.

Para o cálculo do coeficiente  $k$  (Equação 5), foi considerado o fendilhamento por fadiga como o principal modo de degradação dos pavimentos. Assim, para cada pavimento, a extensão horizontal de tração na parte inferior da camada betuminosa foi considerado para o cálculo da vida útil do pavimento.

Para os eixos simples, a extensão de tração para calcular o coeficiente  $k$  é o resultado da aplicação da carga por eixo, enquanto para os eixos duplos e triplos, a extensão de tração tem de ser obtida por uma análise de danos, porque a extensão instalada na passagem do segundo eixo de eixos múltiplos tem duas componentes: a extensão devido ao segundo eixo e a parte da extensão do primeiro eixo que não tenha sido recuperada. O mesmo fenómeno aparece para o terceiro eixo de um eixo triplo.

Para este estudo utilizou-se o método proposto por Huang (2004) para considerar a análise de danos. O método de Huang consiste no cálculo das extensões instaladas no pavimento de acordo com as posições indicadas na Figura 1, em que  $S_t$  representa a distância entre os eixos de um eixo duplo. Para o primeiro eixo, a extensão deve ser obtida sob o primeiro eixo ( $\epsilon_a$ ). Para o segundo e terceiro eixos, a extensão deve ser a diferença entre a extensão sob o primeiro eixo ( $\epsilon_a$ ) e a extensão no ponto médio entre os dois eixos ( $\epsilon_b$ ), resultando em  $\epsilon_a - \epsilon_b$ , como se indica na Figura 1. Os cálculos acima devem ser realizados nas posições indicadas na Figura 1, nomeadamente no centro de uma roda (posição 1); na borda de uma única roda (posição 2) e no centro das rodas duplas (posição 3).

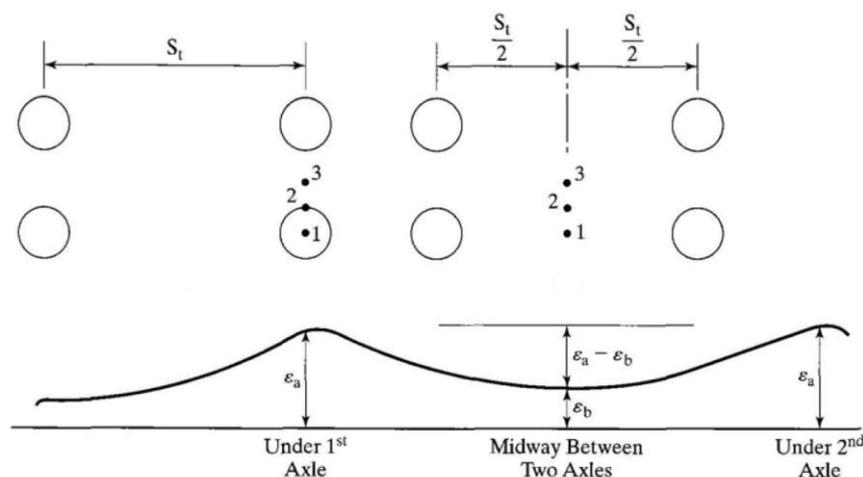


Figura 1. Análise de dano para eixos múltiplos (Huang, 2004)

Quanto ao coeficiente  $c$  da Equação 5, o estudo foi realizado tanto para o valor de 4 como para 5. O valor de 4 é o mais aceite internacionalmente, principalmente devido aos resultados dos ensaios AASHTO. No entanto, tal com se verificou para o método francês, o valor de 5 também é utilizado. Tendo em conta que o coeficiente  $c$  corresponde à inclinação da lei de fadiga representativa do pavimento, e tendo em conta que a principal degradação dos pavimentos é devida à fadiga das misturas betuminosas, este coeficiente deverá corresponder ao expoente da lei de fadiga das misturas betuminosas. Em Portugal a principal lei de fadiga utilizada no dimensionamento de pavimentos é a lei da Shell, a qual apresenta um expoente de 5. No entanto, o valor médio obtido em inúmeros ensaios de fadiga realizados por Pais et al (2009) é aproximadamente de 4, pelo que deverá ser este o valor a utilizar em Portugal para o fator de exponenciação.

### 3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho, a extensão de tração na parte inferior da camada betuminosa dos 900 pavimentos acima descritos foi calculada para seis casos, ou seja, três tipos de eixos e dois tipos de rodas, o que resulta em 5400 casos neste estudo.

Para cada caso estudado, o fator de agressividade foi calculado aplicando a Equação 5, considerando para o coeficiente  $c$  o valor de 4 e 5, tendo-se obtido o valor de  $k$  para cada simulação. Como exemplo, o Quadro 2 apresenta o coeficiente  $k$  de um pavimento com uma camada betuminosa com 5000 MPa de rigidez, uma camada granular com 0,20 m de espessura assente sobre uma fundação com 100 MPa de rigidez, para um coeficiente  $c$  igual a 4. A análise destes resultados revela que todas as variáveis analisadas têm uma influência significativa sobre o coeficiente  $k$  e, portanto, sobre o cálculo do fator de agressividade. Por exemplo, o coeficiente  $k$  de 0,10 m de espessura de camada betuminosa é o dobro do valor obtido para 0,30 m de espessura. O efeito inverso verifica-se para a influência da rigidez da fundação. Além disso, a configuração dos eixos tem uma influência importante sobre o coeficiente  $k$ .

Quadro 2. Coeficiente  $k$  (Equação 5) para diferentes pavimentos e configuração de eixos

Espessura camada betuminosa (m)	Eixo simples  Roda simples	Eixo simples  Roda dupla	Eixo duplo  Roda simples	Eixo duplo  Roda dupla	Eixo triplo  Roda simples	Eixo triplo  Roda dupla
0.10	7.390	1.000	0.771	0.211	0.091	0.024
0.15	5.105	1.000	0.464	0.116	0.062	0.014
0.20	3.788	1.000	0.326	0.074	0.047	0.009
0.25	2.976	1.000	0.260	0.056	0.040	0.007
0.30	2.425	1.000	0.224	0.048	0.037	0.006

Para o desenvolvimento de um modelo para o coeficiente  $k$  (Equação 5) foi verificada a influência de cada parâmetro estudado no valor do  $k$ , tendo-se concluído que para todas as variáveis, incluindo a espessura da camada granular, o coeficiente  $k$  pode ser expresso em função da potência da variável em questão. Além disto, também se verifica que estas relações podem ser diretas ou inversas de acordo com o tipo de pavimento. A separação entre elas é função das propriedades do pavimento, isto é, a espessura e a rigidez das camadas do pavimento, tendo-se verificado que ocorrem para uma espessura equivalente (EE), expressa pela Equação 6, de valor igual a 1,2 m.

$$EE = \sqrt[3]{\frac{H_{bet}^3 \times E_{bet} + H_{gra}^3 \times E_{gra}}{E_{fund}}} \quad (6)$$

sendo:

EE a Espessura Equivalente do pavimento (m);

$H_{bet}$  a espessura da camada betuminosa (m);

$E_{bet}$  o módulo de rigidez da camada betuminosa (MPa);

$H_{gra}$  a espessura da camada granular (m);

$E_{gra}$  o módulo de rigidez da camada granular (MPa);

$E_{fund}$  o módulo de rigidez da fundação do pavimento (MPa).

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo para o cálculo dos fatores de agressividade, considerando o tipo de eixo, o tipo de roda e a constituição do pavimento. Isto foi conseguido através do desenvolvimento de um modelo para quantificar o coeficiente  $k$  (equação 5) função das propriedades do pavimento (espessura e rigidez das camadas do pavimento) e a configuração dos eixos / rodas.

A configuração dos eixos / roda é considerada no modelo por um parâmetro denominado Parâmetro do Eixo (PE). Para a definição do PE, os coeficientes  $k$  foram representados graficamente contra o PE. Os valores de PE apresentados no Quadro 3 são os que conduzem a uma variação periódica do parâmetro  $k$  com os valores de PE, como observado na Figura 2 para o caso de um pavimento com 10 cm de mistura betuminosa com 5000 MPa de rigidez, assente numa camada de base com 20 cm de espessura, com rigidez igual ao dobro da fundação, variando este de 20 a 120 MPa. O PE aumenta desde 1.0 para eixos simples de roda simples até 5.2 para eixos triplos de roda dupla. A análise desta figura revela que o ajuste por uma lei exponencial simula a variação do coeficiente  $k$  com o parâmetro PE.

Quadro 3. Parâmetro do Eixo (PE)

Eixo simples Roda simples	Eixo simples Roda dupla	Eixo duplo Roda simples	Eixo duplo Roda dupla	Eixo triplo Roda simples	Eixo triplo Roda dupla
1.0	2.0	2.7	4.1	3.8	5.2

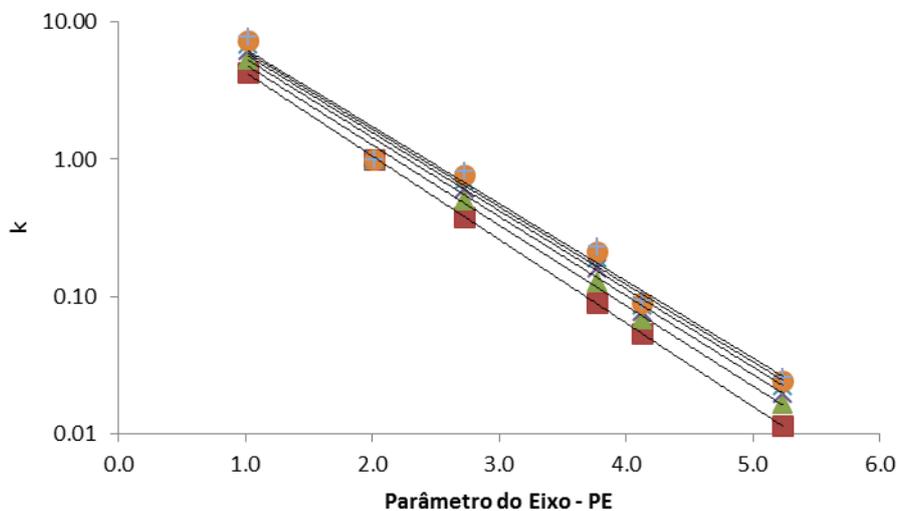


Figura 2. Influência do parâmetro PE no coeficiente  $k$

Dada a influência das propriedades das camadas do pavimento (espessura e rigidez), bem como o PE, a Equação 7 é proposta para modelar o coeficiente  $k$ . Para o caso de eixo simples de roda dupla,  $k = 1$  e, assim, o modelo não necessita de ser aplicado.

$$k = a_1 \times (H_{bet})^{a_2} \times (H_{gra})^{a_3} \times (E_{bet})^{a_4} \times (E_{fund})^{a_5} \times e^{(a_6 \times PE)} \quad (7)$$

sendo:

$H_{bet}$  a espessura da camada betuminosa (m);

$E_{bet}$  o módulo de rigidez da camada betuminosa (MPa);

$H_{gra}$  a espessura da camada granular (m);

$E_{gra}$  o módulo de rigidez da camada granular (MPa);

$E_{fund}$  o módulo de rigidez da fundação do pavimento (MPa);

PE o Parâmetro do Eixo, dado no Quadro 3;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  constantes apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4. Constantes de Equação 7

EE (m)	c	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$R^2$
$\leq 1.2$	4	1.16E+01	-9.66E-01	6.91E-02	-3.01E-01	3.13E-01	-1.42E+00	0.990
$> 1.2$		5.85E+00	9.87E-02	1.80E-03	1.12E-01	-1.14E-01	-1.34E+00	0.974
$\leq 1.2$	5	2.16E+01	-1.12E+00	6.23E-02	-3.49E-01	3.67E-01	-1.80E+00	0.992
$> 1.2$		8.17E+00	8.91E-02	1.79E-03	1.50E-01	-1.50E-01	-1.68E+00	0.961

A qualidade deste modelo pode ser observada na Figura 3, em que os valores de k calculados usando a metodologia empírico-mecanicista, através do software JPav, são representados graficamente em função dos valores previstos pelo modelo desenvolvido neste trabalho, para o caso de  $c=4$  e  $EE \leq 1.2$  m. Para os outros casos, a correlação também apresenta grande qualidade como se observa pelos coeficientes de correlação indicados no Quadro 4.

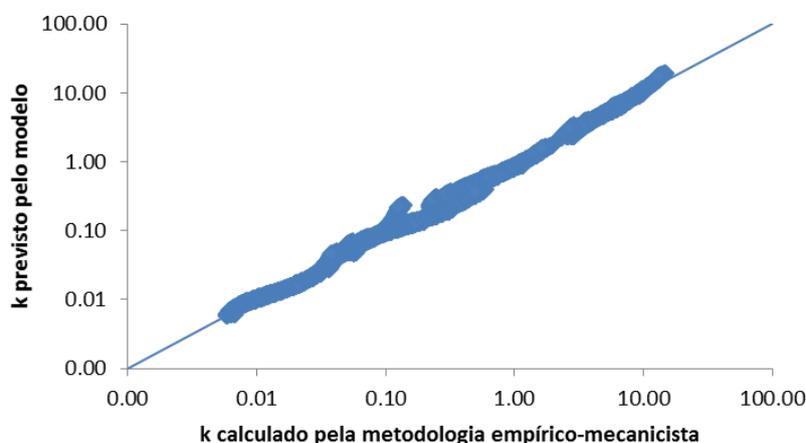
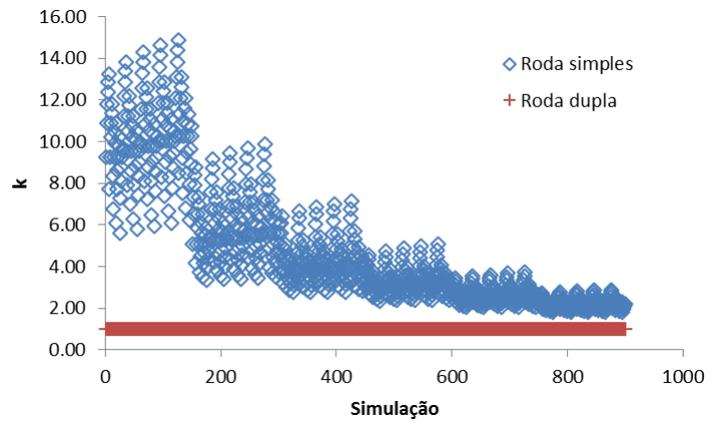
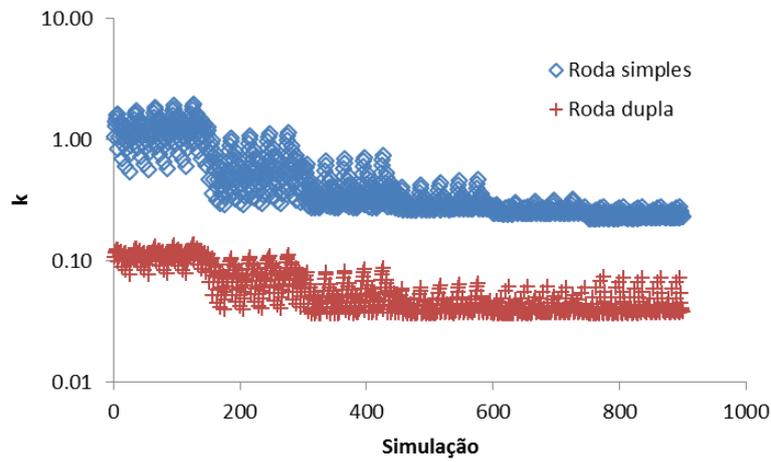


Figura 3. Comparação do parâmetro k calculado com o JPav e pelo modelo estatístico

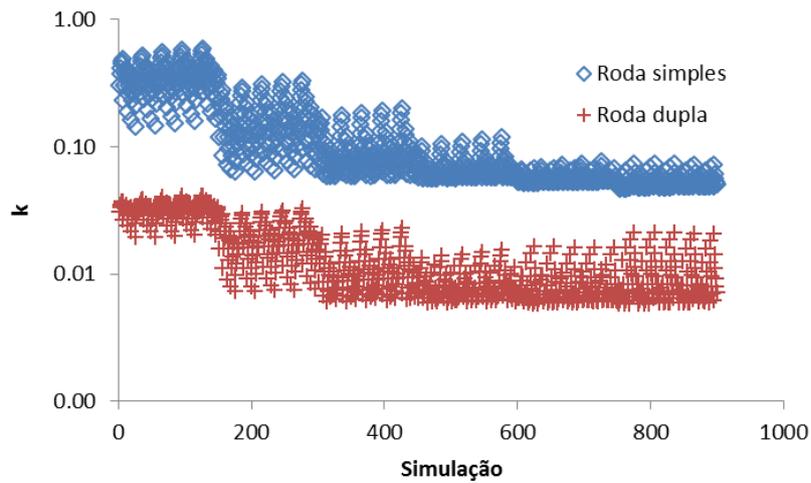
A consideração do tipo de roda dos caminhões na análise da agressividade é extremamente importante porque esta resulta em diferentes valores de k para rodas simples e para as rodas duplas, como se mostra nas Figuras 4 a 6, respectivamente para os eixos simples, duplos e triplos. Com base na análise realizada neste estudo, para a mesma carga, a roda simples conduz a valores de k que podem ser 10 vezes maiores do que o valor obtido para as rodas duplas. Esta conclusão destaca a importância do tipo de roda na avaliação da agressividade e, portanto, na análise e projeto de pavimentos rodoviários. Os valores que se apresentam nestas figuras correspondem às modelações com um fator de exponenciação c igual a 4.



**Figura 4. Diferença do coeficiente k para roda simples e roda dupla para eixo simples**



**Figura 5. Diferença do coeficiente k para roda simples e roda dupla para eixo duplo**



**Figura 6. Diferença do coeficiente k para roda simples e roda dupla para eixo triplo**

Esta conclusão pode também ser observada através da análise da Figura 7, para um coeficiente de exponenciação de 4 e na Figura 8 para um coeficiente de exponenciação de 5, onde os valores médios do coeficiente  $k$  são representados para todas as configurações dos eixos e rodas. Esta figura também pode ser utilizada para definir os valores simplificados para o coeficiente  $k$  (o valor médio para cada tipo de eixo e roda). No entanto, o desvio-padrão elevado observado para cada tipo de eixo e roda indica que a utilização de tais valores deve ser acompanhada por alguma precaução, sendo que os valores médios devem ser usados apenas quando não é possível utilizar o modelo desenvolvido (Equação 7).

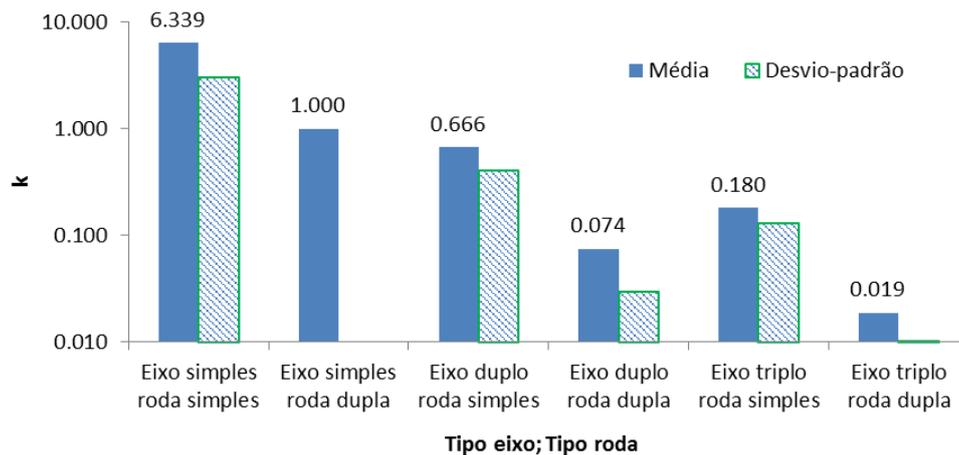


Figura 7. Valores médios do coeficiente  $k$  para todos os tipos de eixo e de roda para  $c=4$

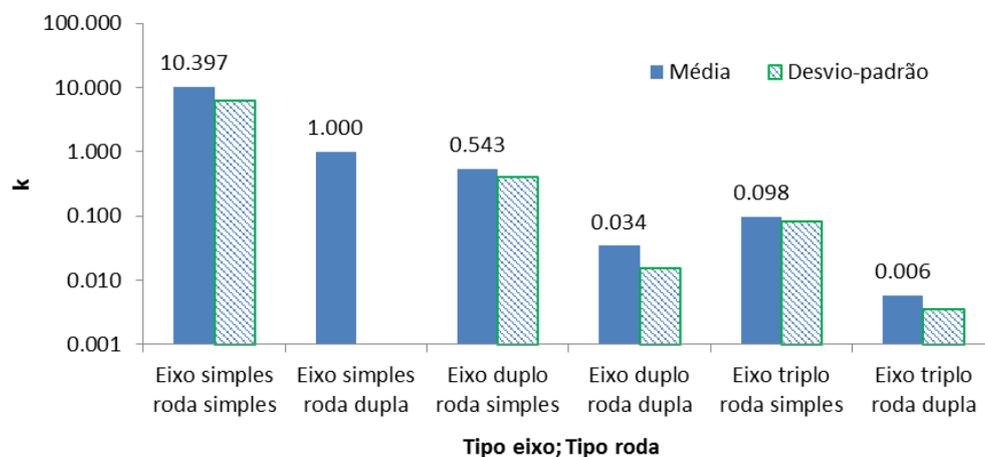
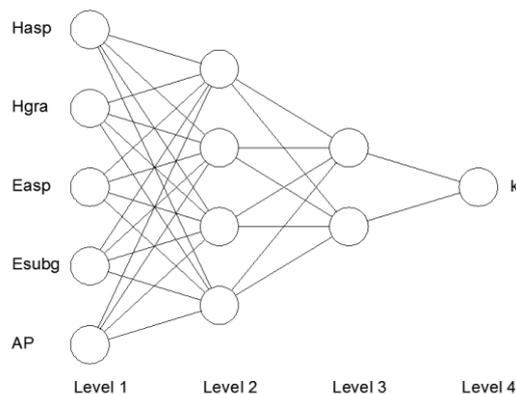


Figura 8. Valores médios do coeficiente  $k$  para todos os tipos de eixo e de roda para  $c=5$

## 5 APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIS

Apesar da qualidade do modelo estatístico que foi desenvolvido, o uso de redes neurais artificiais tem um enorme potencial na modelação de problemas complexos, como o cálculo do coeficiente  $k$  função das variáveis consideradas neste trabalho. A vantagem deste modelo é a sua possível implementação numa folha de Excel. Assim, para este trabalho foi desenvolvido um modelo de rede neuronal artificial para o coeficiente  $k$  previsto de acordo com as características do pavimento e do tipo de roda e eixo.

O modelo tem quatro níveis, nomeadamente, o nível de entrada (nível 1) com 5 nós, dois níveis intermédios (níveis 2 e 3, respetivamente com 4 e 2 nós) e o nível de saída (nível 4) com um nó, correspondendo a um modelo de arquitetura 5-4-2-1, como mostrado na Figura 9.



**Figura 9. Arquitetura utilizada na rede neuronal artificial**

O peso sináptico e polarização (Bias) de cada ligação foram calculados usando o software QNET2000, sendo apresentados no Quadro 5. A qualidade do modelo, expresso pela relação entre os coeficientes k originais e os valores previstos pela rede neuronal artificial desenvolvida, pode ser observada na Figura 10, onde foi obtido um  $R^2$  de 1,000.

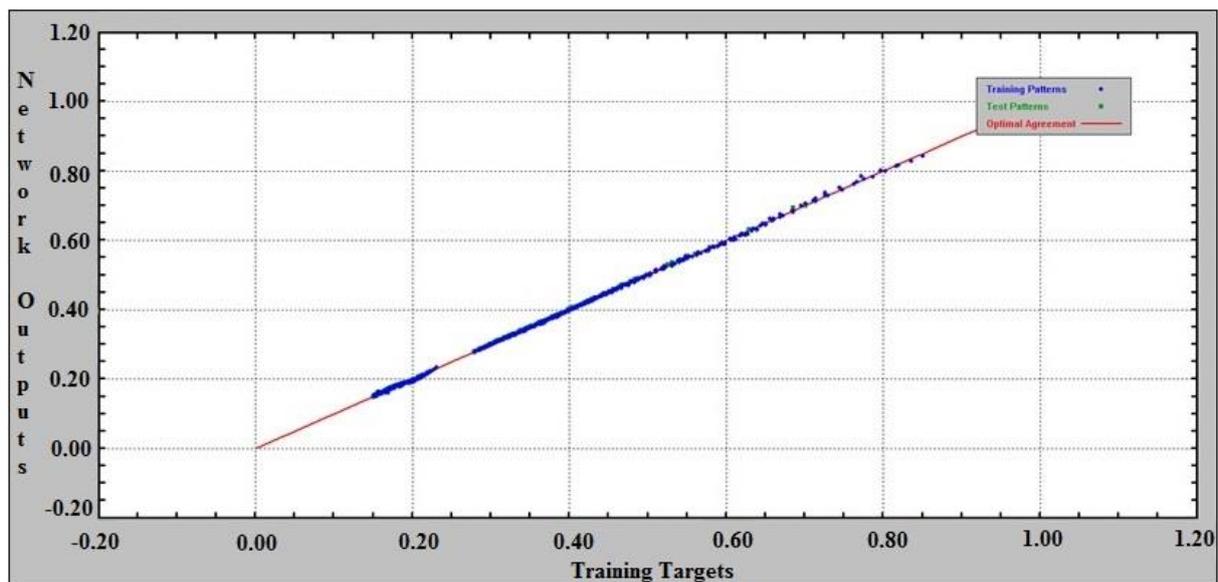
**Quadro 5. Peso sináptico e polarização para a rede neuronal desenvolvida**

		Layer 2				Bias	Output layer (layer 4)
		Node 1	Node 2	Node 3	Node 4		k
Input layer (layer 1)	Hbet	2.29933	-5.42569	-2.68083	-0.82218		
	Hgra	-0.34464	0.43581	0.34726	-0.02513		
	Ebet	0.86772	-1.04906	-6.38637	-0.15277		
	Efund	5.51466	1.07156	0.65546	0.16987		
	PE	-1.29847	-5.90283	-5.52637	-7.70048		
	Bias	0.00925	-0.59196	-0.69706	0.62223		
Layer 3	Node 1	2.33351	-0.81311	-2.14685	-1.97248	-3.50215	-3.8601
	Node 2	.1.88271	-3.29252	-4.48686	-2.72487	3.37904	-5.59374
	Bias						3.74243

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo para definir os fatores de agressividade por eixo para os pavimentos flexíveis, considerando o tipo de eixo (simples, duplo e triplo) e o tipo de roda (simples e dupla). O modelo foi desenvolvido com base no cálculo de 900 pavimentos flexíveis, considerando como mecanismo de ruína o fendilhamento dos pavimentos.

O cálculo do fator de agressividade foi realizado como uma função do quociente da carga real e a carga do eixo-padrão, considerando como potência de exponenciação os valores de 4 e de 5. O fator de agressividade foi considerado pela aplicação de um coeficiente k que expressa o tipo de eixo e o tipo de roda.



**Figura 10. Qualidade da rede neuronal artificial desenvolvida**

De acordo com os resultados deste trabalho, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- O coeficiente k diminui com o aumento da espessura e com a rigidez da camada betuminosa e aumenta com a espessura da camada granular e rigidez. Para pavimentos com uma espessura equivalente superior a 1,2 m e para vários eixos, o coeficiente k apresenta um comportamento inverso;
- O tipo de eixo e roda foi considerado no modelo para o coeficiente k através do Parâmetro do Eixo (PE), que é aproximadamente o número de rodas no eixo;
- O modelo desenvolvido para o coeficiente k apresentou boa qualidade de previsão;
- O tipo de roda nos eixos tem uma influência significativa sobre o coeficiente k, tal como demonstrado pelo valor de k de uma única simples, o qual é aproximadamente 10 vezes maior do que o coeficiente k para uma roda dupla;

Uma rede neuronal artificial foi desenvolvida com grande sucesso para modelar o coeficiente k, o que demonstra a capacidade desta técnica para resolver problemas complexos de previsão. O modelo baseado na arquitetura 5-4-2-1 permitiu obter um  $R^2 = 1.000$  entre os valores originais e previstos.

## 7 REFERÊNCIAS

1. AASHTO, 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. AASHTO, 1962. *The AASHO Road Test*, Highway Research Board of the NAS-NRC Division of Engineering and Industrial Research, Report 5, Special Report 61E, Washington D. C., USA.
3. Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis and Design*, Second Edition. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. USA.
4. LCPC, 1994. *French design method for flexible pavements*, Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris. France.
5. Pais, J.C., Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C., Fontes, L., Kumar, D.S.N.V.A., Silva, B.T.A., 2009. *The prediction of fatigue life using the k1-k2 relationship*, Second Workshop on Four-point Bending, pp 39-46. University of Minho, Guimarães, Portugal.