

APLICAÇÃO DAS REDES NEURONAIS NA CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

SIMONA FONTUL

BOLSEIRA DE DOUTORAMENTO - PRAXIS XXI (FCT), LNEC

MARIA DE LURDES ANTUNES

INVESTIGADORA PRINCIPAL, LNEC

JOÃO MARCELINO

INVESTIGADOR AUXILIAR, LNEC

RESUMO

No contexto dos projectos de Investigação Programada em curso no LNEC, têm-se vindo a efectuar estudos com vista ao aperfeiçoamento das técnicas de ensaio e metodologias de análise para a caracterização estrutural de pavimentos. Um dos aspectos que se tem vindo a estudar é o da optimização da utilização do deflectómetro de impacto conjuntamente com o radar, tendo em vista dispor de novas metodologias mais expeditas para a caracterização estrutural de pavimentos. Neste contexto, está-se a desenvolver um método para interpretação dos resultados dos ensaios, baseado na utilização de redes neuronais.

Na presente comunicação descreve-se o método de cálculo desenvolvido, apresentam-se alguns exemplos de resultados obtidos, e referem-se algumas linhas de desenvolvimento futuro, com vista ao aperfeiçoamento das metodologias adoptadas.

1 INTRODUÇÃO

As metodologias de caracterização estrutural de pavimentos actualmente utilizadas assentam, em geral, na realização de ensaios de carga e na sua posterior interpretação com vista ao estabelecimento de modelos de comportamento estrutural dos pavimentos. Os modelos de cálculo actualmente utilizados na análise estrutural são modelos de camadas elásticas lineares.

Um dos aspectos que se tem vindo a estudar é o da optimização da utilização do deflectómetro de impacto conjuntamente com o radar. Neste contexto, está-se a desenvolver um método para interpretação dos resultados dos ensaios, baseado na utilização de redes neuronais.

Na presente comunicação descreve-se o método de cálculo desenvolvido, apresentam-se alguns exemplos de resultados obtidos, e referem-se algumas linhas de desenvolvimento futuro, com vista ao aperfeiçoamento das metodologias adoptadas.

2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS PAVIMENTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.1 Descrição geral

Os métodos de avaliação da capacidade de carga de pavimentos assentam fundamentalmente em resultados de ensaios de carga não destrutivos, completados com outros ensaios, com base nos quais se estabelece o modelo de comportamento estrutural do pavimento.

O ensaio de carga com o deflectómetro de impacto consiste na aplicação, à superfície do pavimento, de uma força de impulso gerada pela queda de uma massa de uma determinada altura, sobre um conjunto de amortecedores [1]. Esta força é transmitida ao pavimento através de uma placa circular. São medidas as deflexões daí resultantes na superfície do pavimento, em vários pontos. As Figuras 1 e 2 apresentam um aspecto do equipamento e o seu princípio de funcionamento.



Figura 1 – Deflectómetro de impacto

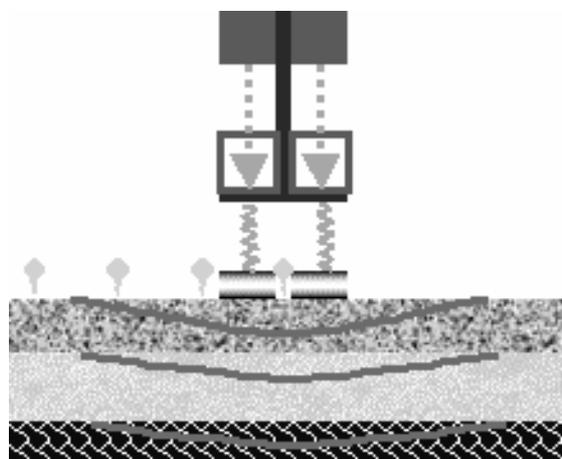


Figura 2 – Deflectómetro de impacto - princípio de funcionamento

O radar (“*Ground Penetrating Radar – GPR*” na literatura em Inglês) é um equipamento de ensaio não-destrutivo destinado a obter informações em contínuo, ao longo de um determinado alinhamento ensaiado, sobre a estrutura que se encontra abaixo da superfície.

O radar transmite e recebe impulsos de alta frequência (micro ondas electromagnéticas) através dos materiais. À medida que a onda se propaga nas várias camadas sofre mudanças de velocidade e de intensidade devido aos fenómenos da absorção e dissipação nos meios que percorre, parte dela sendo reflectida na interface entre camadas de materiais com características dieléctricas diferentes. A informação sobre a constituição do pavimento é dada pela onda reflectida.

As Figuras 3 e 4 apresentam uma fotografia do equipamento radar como também o seu principio de funcionamento.



Figura 3 – Radar

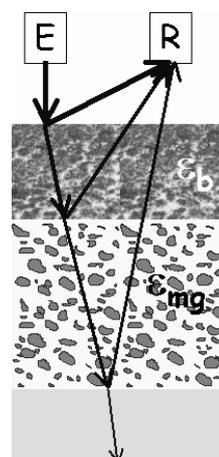


Figura 4 – Radar: Principio de funcionamento

Quando se pretende estudar a capacidade de carga de um determinado trecho de estrada, efectua-se geralmente um considerável número de ensaios de carga, em pontos localizados ao longo das rodeiras externas, por serem estes os alinhamentos em condições mais desfavoráveis. Nos pavimentos de aeroportos é usual efectuar ensaios ao longo de diversos alinhamentos paralelos ao respectivo eixo, sendo estudados com mais detalhe os alinhamentos mais próximos do eixo, por corresponderem a zonas mais solicitadas pelo tráfego.

Os ensaios com o radar, que são utilizados posteriormente para a interpretação dos resultados dos ensaios de carga, são também efectuados segundo perfis longitudinais ao longo das rodeiras externas ou os alinhamentos centrais em pistas de aeroporto.

Salienta-se a importância da realização de sondagens para a interpretação dos resultados dos ficheiros de radar. Geralmente são realizadas depois do tratamento primário dos dados, sendo localizadas em pontos criteriosamente seleccionados, em locais considerados representativos tanto em relação aos resultados obtidos com o radar como também em relação aos obtidos nos ensaios com defléctometro de impacto.

2.2 Tratamento dos resultados

Dado o número elevado de registos obtidos com o equipamento de radar, sentiu-se a necessidade de dispor de uma ferramenta de facilitar a tarefa de interpretação conjunta dos dados obtidos com o FWD e radar. Assim foi desenvolvido um programa de cálculo “FWD_Radar” que permite a combinação dos resultados obtidos com os dois equipamentos e prepara-os para interpretação.(Figura 5)

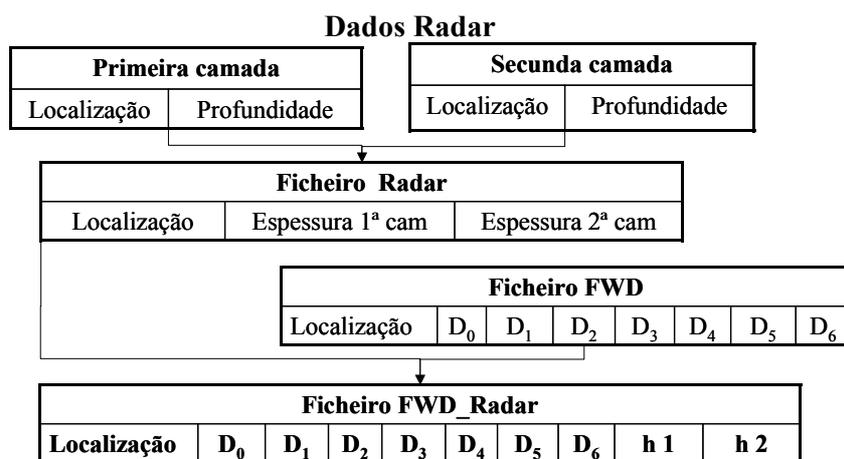


Figura 5 – Pre-processamento de dados do FWD e Radar

O ficheiro assim obtido contem, para cada um dos locais de ensaio com o deflectómetro de impacto, a estrutura do pavimento correspondente (espessura das camadas). Este valor representa, para cada camada, a média das espessuras medidas com o radar localizadas em 5 m a volta da posição da placa do deflectómetro de impacto no mesmo local.

2.3 Estabelecimento de modelos de comportamento estrutural dos pavimentos

Um dos principais objectivos da realização de ensaios não destrutivos no âmbito da avaliação da capacidade de carga de um pavimento é o estabelecimento de modelos de comportamento estrutural.

A interpretação das deformadas medidas com o deflectómetro de impacto é geralmente realizada após uma divisão do pavimento em estudo em zonas consideradas homogéneas de ponto de vista estrutural. Uma vez efectuada a subdivisão, é escolhida a deformada representativa do comportamento de cada zona. A esta escolha esta associada a adopção de determinado grau de confiança.

Utilizando um modelo adequado para análise estrutural do pavimento procura-se, por tentativas, qual o conjunto de módulos de deformabilidade das camadas que conduz a uma deformada calculada tão próxima quanto possível da deformada medida no ensaio. Os

modelos de calculo geralmente utilizados na análise estrutural são, na maioria, modelos de camadas linear elásticas. A busca do conjunto de módulos de deformabilidade é habitualmente efectuada por um processo iterativo não automático, utilizando em regra o programa ELSYM 5, podendo constituir um processo mais ou menos moroso consoante a dificuldade do problema e a sensibilidade do utilizador.

Alguns dos principais problemas apontados para este processo de interpretação são:

- a solução não é única, podendo obter diversas combinações de módulos para uma mesma deformada, dependendo de utilizador;
- por vezes obtêm-se valores para os módulos que não estão de acordo com a natureza e estado das camadas que constituem os pavimentos, requerendo uma certa experiência do utilizador.

Tendo em vista tornar o processo de estabelecimento modelo de comportamento estrutural do pavimento mais eficiente, tem-se a desenvolver uma metodologia de interpretação de ensaios utilizando redes neuronais.

Esta metodologia apresenta as seguintes vantagens:

- permite de uma resolução muito mais rápida do problema, possibilitando a interpretação quase instantânea de todos os resultados obtidos numa campanha de ensaios;
- permite obter valores “realistas” para o modelo de comportamento estrutural, dependendo só do conjunto de dados utilizados durante o treino;
- para cada deformada se obtém uma única resposta.

3 REDES NEURONAIS

Visando a aplicação de redes neuronais na caracterização estrutural de pavimentos foi utilizado um programa de cálculo automático de redes neuronais “Redes 3”, desenvolvido no LNEC [3].

3.1 Conceitos gerais e definição

As Redes Neuronais Artificiais (RNA) são sistemas computacionais constituídos por elementos de processamento simples (neurónios), fortemente interligados e que produzem informação pela alteração do seu estado dinâmico em resposta a estímulos exteriores [4].

A estrutura e funcionamento das RNA é inspirada no funcionamento do cérebro e na mecânica de aprendizagem pelo exemplo. Como no caso do cérebro, as RNA são constituídas por neurónios interconectados entre eles.

Os neurónios artificiais recebem estímulos pelas suas ligações, e através de uma função de transformação, geram outros estímulos que são transmitidos aos neurónios seguintes. A cada ligação esta associado um peso que determina a importância da mesma.

3.2 Neurónio artificial

O neurónio é a unidade elementar de processamento de informação, sendo conectado através das ligações com cada um dos neurónios localizado na proximidade.

As Figuras 6 e 7 ilustram as estruturas do neurónio real (biológico) e do neurónio artificial.

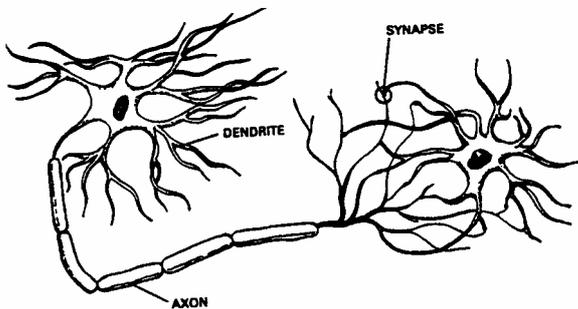


Figura 6 – Neurónio biológico

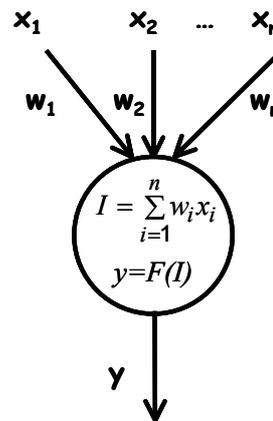


Figura 7 – Neurónio artificial

O neurónio soma os estímulos (x_i) recebidos, ponderados pelos pesos da ligação correspondente (w_i). Este sinal é processado pelo neurónio através da aplicação duma função de transferência “F”. O sinal resultante é após transmitido aos neurónios seguintes.

As funções de transferência mais utilizadas são de tipo “sigmoideal”(em forma de S), sendo adequadas para lidar com problemas de saturação de sinal. A função utilizada no presente estudo é expressa matematicamente por (1):

$$F = \frac{1}{1 + e^{-I}} \quad (1)$$

3.3 Estrutura de uma rede neuronal

Dos diversos tipos de redes actualmente utilizados as mais adequadas em aplicações de modelos de comportamento são as redes de retropropagação de erro (RNRE). O controlo de aprendizagem neste tipo de redes é conseguido através da propagação de erro das camadas de saída dos resultados para as anteriores e ,consequentemente, da correcção das intensidades das ligações entre neurónios.

As RNRE são constituídas por varias camadas de neurónios, duas dessas definem a entrada e a saída dos dados, as restantes são camadas de processamento designadas por camadas escondidas. Um exemplo de uma estrutura de RNRE é apresentado na Figura 8.

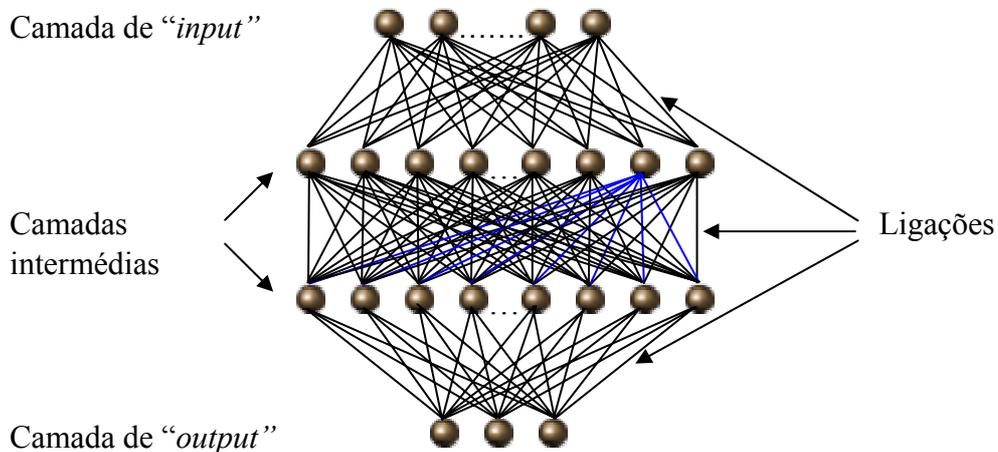


Figura 8 – Rede neuronal com duas camadas intermédias

Os neurónios são conectados através das ligações que têm pesos associados, capacidade de memorizar, e é ao nível das ligações que ocorre o processo de aprendizagem.

A estrutura da rede, o número de neurónios das camadas e o número de camadas intermédias, é escolhida por forma a obter um compromisso entre a velocidade de aprendizagem e o “raciocínio” da rede [5].

3.4 Processo de aprendizagem

O treino representa o processo pelo qual uma rede se adapta ao meio ambiente pretendido. O treino é realizado com base num conjunto de dados conhecidos (*inputs* e *outputs*).

Antes de se iniciar o treino é necessário arbitrar o valor dos pesos para as ligações entre neurónios. Normalmente os pesos atribuídos no início do processo de aprendizagem são números aleatórios “pequenos”, isto é, entre -1 e 1. O processo de aprendizagem (treino) desenvolve-se em três fases.

Na primeira, os sinais de entrada são propagados através das sucessivas camadas até aos neurónios de saída, resultando assim um conjunto de valores que constituem a resposta da rede para os respectivos dados. Na segunda fase, são calculados os erros entre os dados assim obtidos e os resultados pretendidos. Na terceira fase são corrigidos os pesos das ligações através da retropropagação do erro, de forma a melhorar a resposta da rede.

Este processo repete-se o número de vezes que for necessário para a globalidade dos dados de forma a atingir uma resposta satisfatória. O processo de aprendizagem consiste na modificação dos pesos das ligações entre os neurónios.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Apresenta-se um exemplo da aplicação de RN na retroanálise e estabelecimento de modelo de comportamento estrutural do pavimento da pista 10-28 do Aeroporto de Faro. Foi utilizado um programa de cálculo automático de redes neuronais “Redes 3”, desenvolvido no LNEC.

O programa permite aplicar factores de escala aos *inputs* e *outputs*, e escolher as características da rede, o tipo de função de transferência e o tipo de técnica de aprendizagem a utilizar.

Anotam-se em seguida alguns dos principais aspectos a ter em conta na aplicação das RN na caracterização estrutural dos pavimentos:

- Seleccionar quais os parâmetros fixados e quais os variáveis;
- Seleccionar o tipo da função de transferência;
- Estudar o número de casos necessário e suficiente para o treino da rede;
- Estudar o tipo de estrutura da rede, por forma a obter um compromisso entre a velocidade de aprendizagem e o “raciocínio” da rede;
- Estudar a gama de variação das variáveis e os respectivos incrementos

Foram estudadas várias estruturas de RN, sendo considerada a mais adequada uma estrutura com duas camadas intermédias com 15 neurónios cada.

No presente caso, o objectivo da aplicação da rede neuronal é o de substituir o processo de determinação da estrutura do pavimento através da aplicação do programa ELSYM. A rede, é calibrada com os resultados da aplicação deste programa, permitindo assim, “aprender” a simular a sua resposta.

4.1 O treino da rede

No exemplo que se apresenta seguidamente, os parâmetros considerados fixos foram: o diâmetro da placa do deflectómetro de impacto (450 mm), os coeficientes do *Poisson* e a distância entre os transdutores de deslocamento 0, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 e 1800 mm. Neste caso de estudo os *inputs* (dados) da rede são as deflexões e as espessuras das camadas e os *outputs* (resultados) são os módulos das camadas.

Foi estudada uma estrutura de pavimento flexível, composto por uma camada de materiais betuminosos, uma camada de base em material granular e o solo de fundação. Como é habitual em estudos desta natureza, subdividiu-se a camada de solo de fundação em duas camadas: uma camada superior e uma camada inferior mais “rígida”, semi-infinita. As camadas de materiais betuminosos foram consideradas como uma única camada.

Foram gerados 26 000 dados (tanto *inputs* como *outputs*), com base num programa de cálculo que utiliza como subrotina o programa ELSYM. No Quadro 1 apresenta-se a gama de variação dos parâmetros considerados para o modelo estrutural.. Para o treino utilizou-se um conjunto de 1000 dados seleccionados aleatoriamente dentro dos 26 000, mas de forma a englobar, nesses dados, os valores extremos de cada parâmetro. Assim evita-se que a rede necessite de fazer extrapolações.

Quadro 1 – Dados de treino: Parâmetro da estrutura do pavimento

Camada	Misturas betuminosas			Material Granular			Solo de fundação Camada superior			S.F. C. inferior	
	E ₁	h ₁	v ₁	E ₂	h ₂	v ₂	E ₃	h ₃	v ₃	E ₄	v ₄
Parâmetro	MPa	m		MPa	m		MPa	m		MPa	
Valor mínimo	1000	0,22	0,40	200	0,28	0,35	80	2,00	0,35	500	0,35
Valor máximo	6000	0,38	0,40	500	0,32	0,35	240	3,50	0,35	500	0,35

Legend:

E₁, E₂, E₃, E₄, – Módulos de deformabilidade (MPa) adoptadas para as camadas de materiais betuminosos, materiais granulares, camada superior de solo de fundação e camada “rígida” respectivamente;

h₁, h₂, h₃, - Espessuras (m) adoptadas para as camadas de materiais betuminosos, materiais granulares e camada superior de solo de fundação, respectivamente;

v₁, v₂, v₃, v₄, – coeficientes do *Poisson*.

A gama de variação das deflexões obtidas para cada combinação de estruturas de pavimento são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Dados de treino: Deflexões

Deflexões	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆
	µm						
Valor mínimo	271	223	200	178	140	102	57
Valor máximo	1420	1020	827	671	452	325	189

4.2 Validação da RN

A verificação da rede foi realizada com um conjunto de dados, gerados de forma similar aos do treino, situados na mesma gama de variação, mas não utilizados durante o treino. Na Figura 9 apresentam-se as correlações entre os resultados pretendidos e os obtidos com rede neuronal.

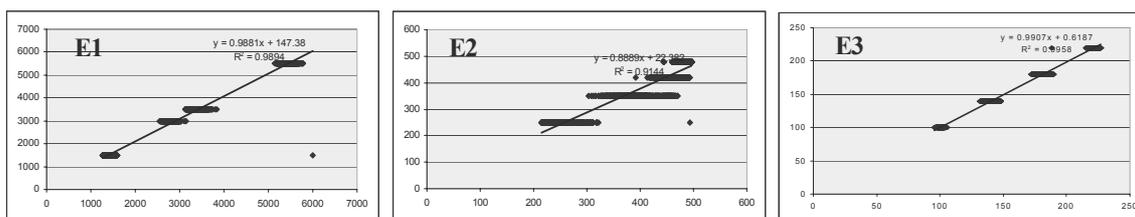


Figura 9 – Validação dos resultados da RN

4.2 Aplicação

Após validação a RN foi aplicada na estabelecimento do modelo de comportamento estrutural do pavimento da pista 10-28 do aeroporto de Faro [6]. A caracterização estrutural do pavimento foi realizada com base nos resultados obtidos *in situ*, através das campanhas de ensaios realizadas com os equipamentos deflectómetro de impacto e o radar.

Na Figura 10 apresenta-se a correlação entre as deflexões medidas no campo e as obtidas utilizando o modelo de comportamento estrutural determinado utilizando a Rede Neuronal.

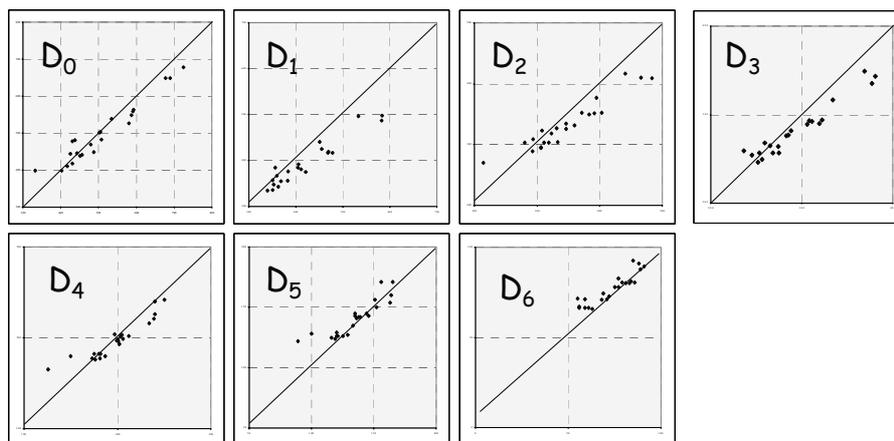


Figura 10 – Correlação das deflexões

Os resultados obtidos apresentam uma boa correlação com os obtidos através dos métodos tradicionais de retroanálise.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O radar permite identificar e localizar com precisão as mudanças na estrutura do pavimento, uma vez que fornece resultados em contínuo.

A sua utilização deve ser feita criteriosamente, sendo necessária a calibração dos resultados através de sondagens.

A utilização conjunta dos resultados do radar e do FWD na caracterização estrutural de pavimentos permite melhorar a metodologia para o estabelecimento de modelo de comportamento estrutural, dado que é possível conhecer as espessuras das camadas em cada ponto de ensaio com o FWD.

As Redes Neurais Artificiais constituem uma ferramenta promissora para o estabelecimento do modelo de comportamento estrutural de pavimentos, uma vez que possibilitam:

- Rapidez na interpretação dos resultados;
- Obtenção de valores “realistas” para os módulos, dependendo dos valores utilizados no treino da rede;
- Obtenção de bons resultados mesmo com um dos “inputs” deficiente

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] – Antunes, M.L.; “Avaliação da capacidade de carga de pavimentos utilizando ensaios dinâmicos” – tese elaborada no LNEC, e submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, 1993.

[2] – Fontul, S; Antunes, M.L; “Utilização do equipamento radar na caracterização estrutural de pavimentos” – 1º Congresso Rodoviário Português. Centro Rodoviário Português. Lisboa, Novembro 2000. 13 páginas.

[3] – Marcelino, João; “Modelação do colapso e da fluência em aterros”, - tese elaborada no LNEC, e submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Porto, 1996.

[4] – Hecht-Nielsen; “Neurocomputing”, Addison-Wesley. New York, 1989.

[5] – Marcelino, João; “Application of neural networks in geotechnical engineering” Proc. “3rd International Workshop of Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering”, Porto, September 1998.

[6] – Antunes, M.L., Fontul, S.; “Avaliação da capacidade de carga da pista 10-28 do aeroporto de Faro” – LNEC – Rel.º Proc.º 92/1/13835 Lisboa, 2000.