

APLICAÇÕES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS

Pedro Marcelino¹, Luís Picado-Santos² e Maria de Lurdes Antunes³

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Avenida do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

email: pmarcelino@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

² CESUR, CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Conselho Diretivo, Avenida do Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal

Sumário

Os conceitos importados da inteligência artificial desempenham um papel cada vez mais importante na investigação científica relativa às infraestruturas rodoviárias. Neste artigo analisa-se a forma como estes conceitos têm sido adaptados para a avaliação do estado dos pavimentos. Assim, é feita uma revisão das técnicas de inteligência artificial utilizadas recentemente, discutindo-se aspetos referentes ao contexto de aplicação das mesmas. Conclui-se que a maioria dos problemas abordados está relacionada com a classificação do estado dos pavimentos e a estimativa de parâmetros estruturais das camadas de pavimento, sendo que as técnicas de inteligência artificial têm-se revelado adequadas à resolução destes problemas.

Palavras-chave: Inteligência artificial; Redes neuronais artificiais (*artificial neural networks*); Lógica difusa (*fuzzy logic*); Sistemas neuro-difusos (*neuro fuzzy*); Avaliação do estado de pavimentos rodoviários.

1 INTRODUÇÃO

Há poucos anos atrás, ferramentas como 'redes neuronais artificiais' (*artificial neural networks*), 'lógica difusa' (*fuzzy logic*) ou 'sistemas neuro-difusos' (*neuro fuzzy*) eram pouco correntes no domínio da engenharia de infraestruturas rodoviárias. Hoje, contudo, estes e outros conceitos importados da área da inteligência artificial são cada vez mais comuns.

Apesar das técnicas de inteligência artificial terem um cariz genérico, a verdade é que estas foram desenvolvidas num contexto bastante diferente daquele que existe na engenharia de infraestruturas rodoviárias. Assim, a adaptação destes métodos às tarefas do engenheiro de infraestruturas constitui um desafio.

Considerando o enorme potencial destas técnicas, é importante que a comunidade científica desperte para a sua utilização. Deste modo, com o intuito de estudar a forma como estes conceitos têm vindo a ser aplicados na avaliação do estado dos pavimentos, é apresentado neste artigo uma revisão de trabalhos científicos recentes, nos quais estas técnicas são utilizadas.

Pretende-se que este trabalho contribua para a clarificação de conceitos importados da inteligência artificial, bem como para uma maior compreensão das aplicações possíveis destas técnicas, segundo o ponto de vista da engenharia civil e, em particular, das infraestruturas rodoviárias.

2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Atualmente, a tecnologia disponível permite recolher e armazenar grandes quantidades de dados. A revolução digital a que se assiste faz com surjam, cada vez mais, equipamentos e aplicações que permitem capturar, guardar e processar volumes significativos de dados de forma económica e acessível.

O crescimento do volume de dados disponível é de tal ordem que é possível afirmar que estamos perante um fenómeno de 'datificação'. Entende-se por datificação neste contexto a tendência atual para que a tecnologia quantifique vários aspetos da nossa vida, permitindo que tudo possa ser analisado objetivamente.

Contudo, é importante estarmos conscientes que os dados por si só não trazem benefícios diretos. De forma a podermos extrair informação e conhecimento dos dados, é necessário recorrer a métodos computacionais que permitam explorar e inferir informação dos mesmos [1, 2].

Isto conduz ao processo de 'descoberta de conhecimento em bases de dados' (*knowledge discovery in databases*). Segundo Fayyad et al. [3], a descoberta de conhecimento em bases de dados consiste na identificação de padrões. Neste contexto, os 'dados' são entendidos como conjuntos de observações (e.g. registos numa base de dados), entendendo-se por 'padrões' uma expressão capaz de definir um subconjunto de dados ou um modelo aplicável a esses subconjuntos. Identificar um padrão pode consistir, por exemplo, em adaptar um modelo aos dados existentes ou encontrar uma estrutura que permita descrever os dados. É importante notar que o uso da palavra 'processo' tem como finalidade reforçar a ideia de que existem vários passos envolvidos na descoberta de conhecimento em bases de dados.

Deste modo, o processo de descoberta de conhecimento em bases de dados refere-se à transformação de dados (baixo nível) em conhecimento (alto nível) [1]. Ao longo deste processo os dados passam por fases de preparação; seleção; pré-processamento; transformação; e interpretação/avaliação.

As técnicas mais aplicadas na identificação de padrões são as técnicas de 'mineração de dados' (*data mining*). De acordo com Berry and Linoff [4], o *data mining* é um conjunto de atividades que explora e analisa grandes quantidades de dados com o intuito de identificar regras e padrões. A principal característica do *data mining* é ser condicionada pelos dados disponíveis, o que significa que a definição de modelos e a determinação de padrões restringe-se aos dados em análise [1, 2].

Tal como é dito por Berry e Linoff [4], o termo *data mining* começou a ser utilizado por pessoas que aplicavam técnicas de 'aprendizado de máquina' (*machine learning*) em áreas afetas à inteligência artificial. Esta comunidade estava interessada em escrever programas que conseguissem simular as capacidades de aprendizagem dos seres humanos, tendo-se inspirado no funcionamento dos processos biológicos humanos para o desenvolvimento destas técnicas [5].

O desenvolvimento de todas estas técnicas levou à conceção de sistemas inteligentes com capacidade de aprender com a experiência, de explorar cenários de incerteza e de se adaptar às alterações que podem ocorrer [6]. Assim, estas técnicas surgem numa perspetiva diferente das técnicas de computação habituais, as quais são baseadas em sistemas de lógica formal.

As redes neuronais artificiais, a lógica difusa e os sistemas neuro-difusos são algumas das técnicas de inteligência artificial mais utilizadas para retirar conhecimento dos dados, sendo estas as técnicas abordadas ao longo deste trabalho.

2.1 Redes Neuronais Artificiais

As redes neuronais artificiais são métodos computacionais inspirados no funcionamento neuronal do cérebro humano. Em 'The Organization of Behaviour' [7], Donald Hebb explicou o processo de adaptação neuronal durante o processo de aprendizagem como sendo uma alteração da força de conexão entre os neurónios. Para muitos, esta explicação é considerada a base do funcionamento das redes neuronais artificiais [8].

O cérebro humano é um sistema complexo. Apesar de existirem diferentes tipos de neurónios, todos eles têm um comportamento semelhante:

- (i) Há um lado de entrada composto por 'dendrites', as quais fazem a ligação aos restantes neurónios e transmitem os sinais de entrada;
- (ii) O corpo celular dos neurónios que funciona como uma unidade de processamento, acumulando os sinais de entradas até que um certo limite seja excedido e faça disparar os neurotransmissores;
- (iii) Há um lado de saída composto por 'axónios', os quais terminam num conjunto de 'sinapses' que se ligam às dendrites dos restantes neurónios.

As redes neuronais artificiais são inspiradas neste modelo simples. Estas redes são modeladas com base em conhecimentos de álgebra linear, sendo as regras de resolução dinâmicas e capazes de evoluir à medida que é adquirida experiência com a resolução de problemas. Apesar destas regras nunca serem definidas explicitamente e, portanto, não serem passíveis de representação simbólica, a verdade é que estas regras podem ser automaticamente aplicadas como se a rede as conhecesse [8].

Uma rede neuronal artificial é composta por 'neurónios' que desempenham funções de processamento. Os neurónios estão ligados entre si, estabelecendo uma rede. A força da ligação existente entre estes neurónios é denominada por 'peso', sendo o peso tanto maior quanto maior for a força da ligação. Tipicamente, os neurónios estão organizados em 'camadas'. Numa rede neuronal artificial convencional há um vetor com dados de entrada, uma ou mais camadas interligadas e um vetor com dados de saída [9, 10, 11, 12].

As redes neuronais artificiais aprendem através de um processo de treino. O treino consiste na aplicação sequencial de vetores de entrada, ajustando-se os pesos da rede até que o vetor de saída apresente resultados consistentes com a realidade observada [11]. Deste modo, os pesos surgem como o parâmetro essencial no processo de aprendizagem das redes neuronais.

Com as redes neuronais artificiais é possível resolver problemas complexos, conseguindo-se soluções adaptáveis a ambientes que variam em tempo real. Contudo, as redes neuronais artificiais são soluções fortemente condicionadas pelos dados utilizados. Como tal, se o processo de treino não for feito adequadamente, as redes podem levar à definição de modelos inadequados [10]. Adicionalmente, estes sistemas são incapazes de explicar os resultados obtidos, pois estes resultam de um processo que realiza inúmeras iterações e combinações difíceis de interpretar [8].

2.2 Lógica Difusa

Introduzido por Lofti Zadeh em 1965, o conceito de lógica difusa é uma abordagem matemática para a expressão da imprecisão e indefinição. A lógica difusa funciona como um ponto de partida para a construção de abordagens que permitem lidar com problemas cuja fonte de incerteza reside na ausência de uma definição clara dos critérios [13].

Na lógica difusa, os elementos têm graus de pertença a cada categoria. Um grau de pertença pode ser definido como uma medida de avaliação que exprime o quanto um dado elemento pertence a uma dada categoria. Ao contrário da lógica clássica, em que as pertenças são binárias (ou pertence ou não pertence), a lógica difusa permite a existência de estados intermédios [5, 13]. Consequentemente, as variáveis linguísticas (e.g. 'muito', 'frequentemente', 'raramente') são aceites na lógica difusa. Um exemplo de um caso em que a lógica difusa é útil é a classificação de uma pessoa (elemento) como jovem ou idosa (categorias), pois a definição dos critérios relativos à classificação de alguém como jovem ou idoso apresentam uma certa subjetividade.

O facto de se poderem traduzir variáveis linguísticas para um formalismo matemático torna a lógica difusa atrativa na resolução de problemas de engenharia, os quais têm subjacente alguma imprecisão, variabilidade e ambiguidade [13].

Segundo McNeill et al. [5], são exemplos de sistemas em que a lógica difusa é especialmente útil:

- (i) Sistemas complexos difíceis de modelar;
- (ii) Sistemas periciais (*expert systems*);
- (iii) Sistemas que utilizam observações humanas como dados de entrada ou base para regras;
- (iv) Sistemas que, por natureza, são imprecisos, tal como os sistemas das ciências sociais.

Uma das formas mais simples de representar o conhecimento humano é expressá-lo na forma: IF premissa, THEN consequência. Conhecendo um determinado facto (premissa), podemos concluir um outro facto (consequência). Dado que este tipo de formulação recorre a variáveis linguísticas, a sua representação por meio da lógica difusa é possível [13]. Tem-se assim que uma parte significativa do conhecimento humano pode ser implementada e automatizada recorrendo à lógica difusa.

Os sistemas difusos são adequados para modelar a opinião de especialistas porque lidam eficazmente com regras linguísticas e são tolerantes a pequenas variações nos parâmetros de entrada do sistema [14]. Tal acontece porque nos sistemas difusos a incerteza faz parte da formulação do sistema em si.

Para conceber um sistema difuso é necessário seguir um processo de cinco passos [5, 15]:

- (i) Construir a base de regras, as quais contêm um conjunto de regras difusas do tipo IF-THEN;
- (ii) Criar uma função de pertença;
- (iii) Desenvolver um processo de inferência que opere sobre a base de regras construída;
- (iv) Implementar um processo de fuzzificação (*fuzzification*) para transformar os dados em dados difusos;
- (v) Implementar um processo de desfuzzificação (*defuzzification*) para transformar os dados difusos em dados.

Através deste processo é possível implementar um sistema de lógica difusa capaz de lidar com contextos de imprecisão, incerteza e ambiguidade.

2.3 Sistemas Neuro-Difusos

Tal como o nome sugere, os sistemas neuro-difusos resultam da combinação das redes neuronais artificiais com a lógica difusa. Esta combinação pode ser considerada um caso particular dos sistemas híbridos. Nos sistemas híbridos, a combinação de redes neuronais artificiais, lógica difusa, algoritmos genéticos e outros, permite melhorar a eficácia dos sistemas [16]. Os sistemas híbridos procuram melhorar o desempenho dos sistemas de um modo que nenhuma das técnicas isoladamente conseguiria.

Qualquer técnica de inteligência artificial tem propriedades computacionais específicas. Como tal, algumas técnicas são adequadas para a resolução de alguns problemas, mas não o são para outros. Por exemplo, apesar das redes neuronais artificiais apresentarem diversas vantagens devido à sua capacidade de aprendizagem, adaptação e generalização, são incapazes de explicar os resultados obtidos. Já no caso dos sistemas difusos, verifica-se que estes têm um mecanismo de inferência em contextos de incerteza que permite compreender os resultados obtidos, contudo, estes sistemas não conseguem, de forma autónoma, adquirir as regras necessárias para alcançar tais resultados. Assim, a combinação de técnicas é uma forma de procurar explorar as vantagens de cada uma delas, ao mesmo tempo que se suprime as suas desvantagens [17].

Segundo Fullér [16], existem dois tipos de sistemas neuro-difusos. Um dos tipos consiste em aplicar um processo de desfuzzificação para transformar as proposições linguísticas e, a partir daí, construir um vetor com dados de entrada para a rede neuronal artificial. O outro tipo implica a utilização dos princípios das redes neuronais no processo de inferência dos sistemas difusos, melhorando e otimizando um processo que de outra forma seria mais moroso.

O crescente número de aplicações dos sistemas neuro-difusos resulta dos benefícios obtidos pela combinação das técnicas de redes neuronais artificiais com a lógica difusa. Esta combinação permite obter soluções capazes de lidar com a incerteza, imprecisão e subjetividade; ao mesmo tempo que garante soluções evolutivas que aprendem com a experiência.

3 AVALIAÇÃO DO ESTADO DOS PAVIMENTOS COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A aplicação de técnicas de inteligência artificial tem vindo a crescer na engenharia de infraestruturas rodoviárias. Os investigadores têm focado o seu interesse no desenvolvimento de aplicações que lhes permitam lidar com problemas que, com os métodos clássicos, têm-se revelado difíceis de modelar e solucionar [18].

As questões relacionadas com a engenharia de infraestruturas rodoviárias, como por exemplo a avaliação do estado dos pavimentos, a previsão do seu desempenho e a otimização das decisões, apresentam diversos aspetos que tornam a aplicação das técnicas de inteligência artificial atrativa. Algumas destas características foram evidenciadas por Flintsch e Chen [14]:

- (i) Na engenharia de infraestruturas rodoviárias os dados tendem a ser imprecisos, incertos, ambíguos e incompletos;
- (ii) A resolução de problemas como a gestão das infraestruturas, nos quais têm de ser interpretados dados qualitativos e quantitativos, envolvem regras sofisticadas de inferência e o conhecimento de especialistas;
- (iii) O volume de dados com o qual é preciso lidar tem grandes dimensões.

Deste modo, constata-se que os problemas apresentam um tipo de complexidade que, para serem resolvidos com os métodos clássicos, implica a assunção de hipóteses simplificativas.

Considerando que, no que respeita aos problemas relacionados com as infraestruturas rodoviárias, é necessário lidar com situações em que surgem dados qualitativos e em que a modelação é difícil, a utilização de redes neuronais artificiais, lógica difusa e sistemas neuro-difusos torna-se adequada.

Na maioria dos sistemas de gestão de pavimentos, a avaliação do estado dos pavimentos é uma das tarefas principais. É através da avaliação do estado dos pavimentos que podemos aferir se eles estão em condições de cumprir os seus propósitos. Assim, dada a importância do tema, este artigo foca-se na revisão de aplicações recentes de inteligência artificial para a avaliação do estado dos pavimentos.

Da revisão efetuada, é possível verificar que a comunidade científica tem-se focado no estudo de dois tipos de problemas:

- (i) Problemas relacionados com a classificação do estado dos pavimentos;
- (ii) Problemas relacionados com a determinação de parâmetros técnicos relativos às camadas de pavimento.

Desenvolve-se nos pontos seguintes cada um destes problemas.

3.1 Classificação de Pavimentos

A classificação de pavimentos é uma forma de catalogar o seu estado, servindo como elemento de diagnóstico em qualquer sistema de gestão de pavimentos. A manutenção dos pavimentos num estado aceitável, quer do ponto de vista funcional, quer do ponto de vista estrutural, envolve a consideração de vários fatores que se alteram ao longo do tempo e que têm de ser monitorizados.

Existem diversos indicadores que permitem classificar o estado dos pavimentos. Estes podem considerar e combinar diferentes aspetos relacionados com o fendilhamento, deflexões, textura e outros. Os indicadores mais comuns são: Pavement Condition Index (PCI), Pavement Distress Index (PDI), Pavement Condition Ratio (PCR), Present Serviceability Index (PSI) e Pavement Condition Assessment (PCA).

O principal problema na classificação de pavimentos é a informação ser, em muitos casos, incerta, subjetiva e dependente da opinião de especialistas. Assim, é com naturalidade que muitos dos artigos recentes que versam sobre a classificação de pavimentos aplicam técnicas de inteligência artificial baseadas na lógica difusa.

3.2 Estimativa de Parâmetros das Camadas

Uma das tarefas mais importantes do engenheiro de infraestruturas rodoviárias é a gestão da conservação das infraestruturas existentes. Nos processos de gestão da infraestrutura, o conhecimento dos parâmetros estruturais é essencial, pois são estes que permitem estimar a vida útil dos pavimentos, sendo este um dado essencial para a otimização dos investimentos com a conservação. Todo o planeamento referente à manutenção da infraestrutura está dependente destes parâmetros.

A avaliação estrutural é normalmente baseada na medição das deflexões do pavimento aquando da aplicação de uma carga de superfície conhecida. O estado do pavimento condiciona a forma de propagação desta carga. Nas últimas décadas a avaliação das condições estruturais do pavimento tem sido feita com o 'defletómetro de impacto' (*falling weight deflectometer*) [19]. Com o defletómetro é possível realizar um ensaio de carga não destrutivo que permite estimar as propriedades estruturais das camadas de pavimento através do perfil de deflexões.

O processo de cálculo para estimar as propriedades das camadas de pavimento envolve o recurso à retroanálise. Devido a restrições teóricas existentes, os procedimentos de retroanálise só por si, não são suficientes para encontrar os valores 'verdadeiros', requerendo assim experiência por parte de quem os aplica e interpreta. Dado que as redes neuronais artificiais são adequadas a problemas complexos, a sua aplicação como alternativa à retroanálise é comum [20].

4 TRABALHOS RECENTES E SUA DISCUSSÃO

A revisão de trabalhos recentes permitiu concluir que há dois tipos de problemas relativos à avaliação de pavimentos que têm concentrado as atenções da comunidade científica: problemas relacionados com a classificação do estado dos pavimentos; e problemas relacionados com a estimativa de parâmetros técnicos relativos às camadas de pavimento.

Dado que estes problemas colocam desafios diferentes, o primeiro aspeto a salientar é que as técnicas vulgarmente aplicadas em cada um destes problemas são distintos. Na classificação de pavimentos é habitual recorrer-se à lógica difusa, sendo que na estimativa dos parâmetros é mais comum utilizar redes neuronais artificiais. Os sistemas neuro-difusos têm sido aplicados em ambos os casos.

4.1 Classificação de Pavimentos

No que se refere a trabalhos relativos à classificação de pavimentos com técnicas de inteligência artificial, foram analisados os trabalhos expressos no Quadro 1.

Quadro 1. Trabalhos sobre classificação de pavimentos

Artigo	Técnica	Base de conhecimento
Mahmood et al. (2013) [21]	Lógica difusa	Base de dados
Koduru et al. (2010) [22]	Lógica difusa	Especialistas
Pan et al. (2011) [23]	Lógica difusa	Especialistas
Sun e Gu (2010) [24]	Lógica difusa	Especialistas
Bianchini e Bandini (2010) [25]	Sistemas neuro-difusos	Base de dados

Nestes trabalhos verifica-se que, independentemente do índice que se considere para efetuar a classificação dos pavimentos, existe sempre uma preocupação com a ambiguidade do processo de avaliação. Como em qualquer processo subjetivo, a incapacidade de padronizar conduz a problemas na implementação de estratégias: torna-se difícil transferir conhecimento entre casos semelhantes; o conceito de coerência começa a perder significado; e a introdução de valores imprecisos pode levar a decisões inadequadas. Assim, a lógica difusa surge como uma solução, não para eliminar o caos, mas para ajudar a geri-lo.

De acordo com os resultados expressos nos trabalhos analisados, verifica-se que a lógica difusa permite reduzir a ambiguidade existente. Tal situação foi notória nos casos em que o conhecimento foi extraído da opinião de especialistas, assim como nos casos em que foram utilizados registos de bases de dados para a construção/calibração de modelos.

Apesar dos resultados serem promissores, é necessário referir que a determinação das funções de pertença e das regras utilizadas nos sistemas difusos apresentam subjetividade. A resposta a questões como o número de funções de pertença necessárias ou o número de regras a considerar no sistema não é clara. Para além disso, a forma como os modelos foram desenvolvidos nos estudos apresentados está fortemente ligada aos dados específicos de cada caso, o que implica cautelas na generalização dos resultados obtidos.

4.2 Estimativa de Parâmetros das Camadas

No que concerne aos problemas relativos à estimativa de parâmetros relativos às camadas de pavimento, analisaram-se os trabalhos apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Trabalhos sobre estimativa de parâmetros das camadas

Artigo	Técnica	Base de conhecimento
Gopalakrishnan et al. (2013) [26]	Redes neuronais artificiais	Dados sintéticos e reais
Gopalakrishnan (2010) [27]	Redes neuronais artificiais	Dados sintéticos
Terzi et al. (2013) [28]	Redes neuronais artificiais	Dados reais
Saltan et al. (2011) [29]	Redes neuronais artificiais	Dados reais
Saltan et al. (2013) [30]	Redes neuronais artificiais	Dados sintéticos
Zaman et al. (2010) [31]	Redes neuronais artificiais	Dados reais
Sharma e Das (2008) [32]	Redes neuronais artificiais	Dados sintéticos
Gopalakrishnan e Khaitan (2010) [33]	Sistemas neuro-difusos	Dados sintéticos

A maioria dos estudos referidos teve como objetivo a determinação do módulo elástico das camadas de pavimento. O processo de retroanálise habitualmente seguido implica a utilização de uma abordagem iterativa, a qual sofre de limitações como, por exemplo, a dependência do módulo relativamente ao módulo definido no início da iteração. Deste modo, justifica-se a investigação feita em torno de soluções alternativas como as redes neuronais artificiais.

Os resultados apresentados nos vários artigos confirmam a utilidade das redes neuronais em casos complexos, nos quais o comportamento é não linear. Verificou-se que as redes neuronais artificiais permitem estimar outros parâmetros que não o módulo elástico das camadas. Foi também possível observar que as redes neuronais beneficiam da capacidade de aprendizagem, a qual lhes permite construir e calibrar as relações entre as diferentes variáveis.

Contudo, apesar destes resultados, constata-se que as redes neuronais artificiais têm um comportamento do género 'caixa negra', ou seja, um comportamento em que não é claro o que ocorre durante o processo. Isto pode ser um problema se as soluções forem implementadas cegamente e de forma desligada do significado físico das situações em estudo. Outro aspeto a salientar é que, de acordo com os resultados obtidos, os modelos desenvolvidos não conseguem obter valores fora da gama dos dados utilizados para treinar a rede.

No referente aos sistemas neuro-difusos verifica-se que, tanto para este tipo de problemas como para os do ponto anterior, a combinação das diferentes técnicas permite ultrapassar as limitações individuais de cada uma delas. As redes neuronais artificiais oferecem capacidades de aprendizagem que podem ser integradas com a lógica difusa, sendo que a lógica difusa fornece a estrutura necessária para a interpretação e explicação dos resultados produzidos pelas redes neuronais. Assim, não é de estranhar que, nos próximos tempos, se assista a um crescimento destas soluções.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho reviram-se aplicações recentes das técnicas de inteligência artificial a problemas relacionados com a avaliação de pavimentos.

Começou-se por enquadrar o problema referindo o crescente interesse que estas técnicas têm suscitado na engenharia de infraestruturas rodoviárias. Posto isto, foi feita uma resenha das principais técnicas utilizadas, resumindo os seus princípios operacionais. Numa terceira parte, referiram-se os problemas mais comuns na avaliação de pavimentos e a forma como as técnicas de inteligência artificial podem contribuir para a resolução dos mesmos. Por fim, sintetizaram-se as conclusões retiradas da análise de um conjunto de trabalhos em que, efetivamente, foram aplicadas técnicas de inteligência artificial para resolver problemas relacionados com a avaliação de pavimentos.

Constatou-se que cada técnica tem características próprias, o que faz com que, para cada tipo de problema, haja uma técnica mais adequada. Assim, verificou-se que nos problemas de classificação de pavimentos é usual recorrer-se à lógica difusa, enquanto que nos problemas de estimativa dos parâmetros das camadas de

pavimentos é comum utilizarem-se as redes neuronais artificiais. Em ambos os problemas é possível aplicar sistemas neuro-difusos.

De um modo geral, as técnicas de inteligência artificial obtiveram resultados promissores. No entanto, é de salientar que estas técnicas são fortemente condicionadas pelos dados existentes, o que pode dificultar a generalização das conclusões alcançadas em cada estudo.

Como conclusão final, é importante realçar que as técnicas de inteligência artificial parecem ser, cada vez mais, uma solução com larga aplicação num futuro próximo. Hoje vivemos num mundo dominado pelos dados e pela tecnologia, no qual o grande desafio coloca-se na capacidade de extrair utilidade de tudo aquilo que temos disponível. As potencialidades são muitas mas, como sempre, só há dados com valor acrescentado se houver quem seja capaz de os interpretar, o que faz com que o engenheiro continue a ter um papel fundamental em todo o processo.

6 REFERÊNCIAS

1. Mitra, S., Pal, S. K. e Mitra, P., Data mining in soft computing framework: a survey. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(1) 3-14, 2002.
2. Miradi, M., *Knowledge Discovery and Pavement Performance: Intelligent Data Mining*, Thesis (PhD), Delft University of Technology, 2009.
3. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. e Smyth, P., From data mining to knowledge discovery in databases. *AI magazine*, 17(3) 37, 1996.
4. Berry, M. e Linoff, G., *Mastering Data Mining*, John Wiley & Sons, 2000.
5. McNeill, F. M., Thro, E. e Yager, R. R., *Fuzzy logic: a practical approach*, Boston, MA: AP professional, 1994.
6. Zadeh, L. A., Fuzzy logic, neural networks, and soft computing, *Communications of the ACM*, 37(3) 77-84, 1994.
7. Hebb, D., *The Organization of Behaviour*, John Wiley & Sons, 1949.
8. Kononenko, I. e Kukar, M., *Machine learning and data mining*, Elsevier, 2007.
9. Kecman, V., *Learning and soft computing: support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models*, MIT Press, 2001.
10. Bosurgi, G., Trifirò, F. e Xibilia, M. G., Artificial Neural Network for Predicting Road Pavement Conditions, *4th International SIIV Congress*, Palermo, Italy, 2007.
11. Wasserman, P. D., *Neural computing*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
12. Saltan, M. e Sezgin, H., Hybrid neural network and finite element modeling of sub-base layer material properties in flexible pavements. *Materials & Design*, 28(5) 1725-1730, 2007.
13. Ross, T., *Fuzzy logic with engineering applications*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2004.
14. Flintsch, G. W. e Chen, C., Soft computing applications in infrastructure management, *Journal of Infrastructure Systems*, 10(4) 157-166, 2004
15. Jang, J., ANFIS: Adaptive-Neuro-Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3) 665-685, 1993.
16. Fullér, R., *Introduction to neuro-fuzzy systems*, Vol. 2, Springer, 2000.
17. Zadeh, L. A., Applied Soft Computing – Foreword, *Applied Soft Computing*, 1(1) 1-2, 2001.
18. TRB, *Artificial Intelligence in Transportation*, Circular no. E-C113, Transportation Research Board, 2007.
19. Alavi, S., LeCates, J. F. e Tavares, M. P., *Falling weight deflectometer usage*, NCHRP Synthesis 381, Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.

20. Fontul, S., *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests*, Thesis (PhD), University of Coimbra – Faculty of Science and Technology, 2004.
21. Mahmood, M., Rahman, M., Nolle, L. e Mathavan, S., A Fuzzy Logic Approach for Pavement Section Classification, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(5) 620-626, 2013.
22. Koduru, H. K., Xiao, F., Amirkhanian, S. N. e Juang, C. H., Using Fuzzy Logic and Expert System Approaches in Evaluating Flexible Pavement Distress: Case Study, *Journal of Transportation Engineering*, 136(2) 149–158, 2010.
23. Pan, N. F., Ko, C. H., Yang, M. D. e Hsu, K. C., Pavement performance prediction through fuzzy regression, *Expert Systems with Applications*, 38(8) 10010-10017, 2011.
24. Sun, L. e Gu, W., Pavement condition assessment using fuzzy logic theory and analytic hierarchy process, *Journal of Transportation Engineering*, 137(9) 648-655, 2010
25. Bianchini, A. e Bandini, P., Prediction of Pavement Performance through Neuro-Fuzzy Reasoning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(1) 39–54, 2010.
26. Gopalakrishnan, K., Agrawal, A., Ceylan, H., Kim, S. e Choudhary, A., Knowledge discovery and data mining in pavement inverse analysis, *Transport*, 28(1) 1-10, 2013.
27. Gopalakrishnan, K., Effect of training algorithms on neural networks aided pavement diagnosis, *International Journal of Engineering - Science and Technology*, 2(2) 83-92, 2010.
28. Terzi, S., Saltan, M., Küçükşille, E. U. e Karaşahin, M., Backcalculation of pavement layer thickness using data mining, *Neural Computing and Applications*, 23(5) 1369-1379, 2013.
29. Saltan, M., Terzi, S. e Küçükşille, E. U., Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining, *Expert Systems with Applications*, 38(3) 2600-2608, 2011.
30. Saltan, M., Uz, V. E. e Aktas, B., Artificial neural networks–based backcalculation of the structural properties of a typical flexible pavement, *Neural Computing and Applications*, 23(6) 1703-1710, 2013.
31. Zaman, M., Solanki, P., Ebrahimi, A. e White, L., Neural network modeling of resilient modulus using routine subgrade soil properties, *International Journal of Geomechanics*, 10(1) 1-12, 2010.
32. Sharma, S. e Das, A., Backcalculation of pavement layer moduli from falling weight deflectometer data using an artificial neural network, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(1) 57-66, 2008.
33. Gopalakrishnan, K. e Khaitan, S., Finite element based adaptive neuro-fuzzy inference technique for parameter identification of multi-layered transportation structures, *Transport*, 25(1) 58-65, 2010.