

João M.C.
Estêvão
Área
Departamental
de Eng^a Civil
EST/UALg

Aplicações da Inteligência Artificial na Engenharia Sísmica

RESUMO

Alguns métodos do domínio da inteligência artificial têm vindo a ser utilizados na engenharia civil, nomeadamente na engenharia sísmica, pelo que se faz, neste artigo, um resumo das diversas aplicações sugeridas por um elevado número de investigadores.

1. Introdução

Os estudos realizados no âmbito da engenharia sísmica, apresentam grande complexidade, face à elevada incerteza que os caracterizam e em virtude de serem não lineares. Para tentar solucionar alguns desses problemas, vários investigadores têm proposto, nas duas últimas décadas, que se recorra ao desenvolvimento de sistemas periciais, sistemas *fuzzy*¹, redes neuronais e redes *fuzzy* neuronais, designadamente nas avaliações do risco sísmico (análise da casualidade e da vulnerabilidade sísmica), para modelar o comportamento não linear dos materiais sujeitos a acções cíclicas e no controlo activo de estruturas.

Actualmente, a forma mais exacta de se procederem a avaliações do risco sísmico de edifícios, é recorrer a modelos numéricos de comportamento não linear, para calcular um nível de danos provável, que seja consistente com a sismicidade da região envolvente ao local onde se situa o edifício. Face à morosidade deste tipo de análise, não é possível, actualmente, a sua aplicação em aglomerados habitacionais (com grande número de edifícios). Por outro lado, na maioria dos casos, não existe disponível informação detalhada sobre os edifícios, designadamente os projectos dos mesmos, pelo que é corrente o recurso à opinião de peritos, em engenharia sísmica, sobre o risco sísmico desses edifícios. Deste modo, a grande aplicação da inteligência artificial na engenharia sísmica, está a verificar-se ao nível das avaliações do risco sísmico, na tentativa de resolver os problemas inerentes à opinião subjectiva dos técnicos que procedem a este tipo de avaliação.

¹ Não existindo uma palavra que traduza, por completo, o conceito "fuzzy" (vago, incerto, subjectivo), obtou-se pela não tradução. Alguns autores traduzem "fuzzy" por difuso.

2. Sistemas periciais

O desenvolvimento dos sistemas informáticos tem sido precursor da proliferação de sistemas periciais com capacidade para lidar com complexos sistemas estruturais. Pode definir-se um sistema pericial como sendo um programa de computador, interactivo, que incorpora a capacidade de decisão, a experiência e a intuição de um perito, na resolução de problemas (Berrais e Watson, 1993).

Para o desenvolvimento de um sistema pericial é necessário obter o conhecimento do perito (pessoa empreendedora com desempenho acima da média, com o conhecimento e a experiência necessária à resolução dos problemas, possuindo muitos conhecimentos de informática) e implementar, em seguida, esse conhecimento em computador. Os sistemas periciais, baseados em regras, englobam três partes distintas:

- Factos - que descrevem aspectos do domínio do problema;
- Regras - que descrevem o que o perito poderá fazer com esses factos;
- Motor de inferência - da mesma forma que a mente humana deduz a solução de um problema com base em factos e na experiência pessoal, o motor de inferência combina os factos e as regras na base de conhecimento para chegar a uma conclusão (Payne e McArthur, 1992).

Os sistemas periciais têm sido utilizados na análise da vulnerabilidade sísmica, introduzindo avaliações heurísticas do comportamento de edifícios. Estes sistemas, que possuem a vantagem de possibilitarem a incorporação de informação subjectiva, têm a grande desvantagem de não efectuarem a correlação dos resultados do sistema, com a probabilidade de ocorrerem determinados níveis de danos, previamente estabelecidos (Corsanego *et al.*, 1986).

Muitos dos sistemas periciais, aplicados a problemas de vulnerabilidade sísmica, são baseados em regras do tipo:

SE: <EDIFÍCIO tipo "X"> E <com ATRIBUTOS "Y">
E <SISMO de intensidade "I">
ENTÃO:
<DANOS do nível "S">

Alguns exemplos de aplicações dos sistemas periciais, na análise da vulnerabilidade sísmica, são os trabalhos de

Thurston (1990), Gavarini (1992) e Salvaneschi *et al.* (1997).

3. Sistemas fuzzy

As incertezas que caracterizam os problemas da engenharia sísmica, podem ser classificadas em dois grupos distintos:

- Incertezas que se relacionam com o comportamento aleatório de sistemas físicos;
- Incertezas associadas à percepção, pensamento e raciocínio humano, bem como à informação cognitiva em geral (resultante, por exemplo, de um inquérito ao desempenho de um edifício).

Enquanto que, para tratar as incertezas do primeiro grupo, o recurso ao cálculo probabilístico não só é possível, como é recomendável, em relação ao segundo grupo é mais apropriado o recurso à matemática fuzzy (teoria de conjuntos fuzzy e lógica fuzzy).

Nos anos sessenta, Zadeh introduziu o conceito de conjunto fuzzy, como meio de tratar matematicamente valores linguísticos (por exemplo “Muito Vulnerável” ou “Pouco Vulnerável”, em que “Muito” e “Pouco” são atributos da variável linguística “Vulnerabilidade”). Na teoria de conjuntos fuzzy, a pertença ou não de um elemento a um conjunto, é indicada em vários graus (função de pertença), com valores compreendidos entre 0 e 1, como é apresentado nas figuras 1 e 2 (Hadipriono, 1995).

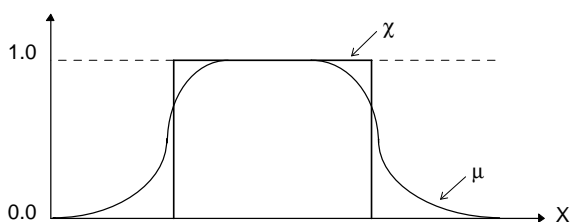


FIGURA 1 - Função característica χ , para um conjunto clássico e função de pertinência μ , para um conjunto fuzzy (adaptado de Hu *et al.*, 1996).

Na teoria de conjuntos clássica, se desejássemos definir o conjunto das “vigas altas”, estas seriam, por exemplo, aquelas que apresentassem alturas superiores a 0.70 m. Uma viga com 0.69 m, já seria incluída no conjunto das “vigas baixas”, não sendo a classificação mais adequada. A teoria de conjuntos fuzzy permite lidar com este tipo de problemas de forma mais eficaz.

Cada vez mais é aceite a ideia de que é necessária a incorporação de aspectos relacionados com o vago e incerto, nos sistemas baseados em regras. Os sistemas mais antigos funcionavam de forma heurística. Posteriormente, surgiram sistemas baseados na teoria das probabilidades. Estes tipos de sistemas permitem a execução de mecanismos de raciocínio com base em informação imperfeita. Uma via alternativa consiste no raciocínio possibilístico, com recurso à lógica fuzzy (Kruse *et al.*, 1994)

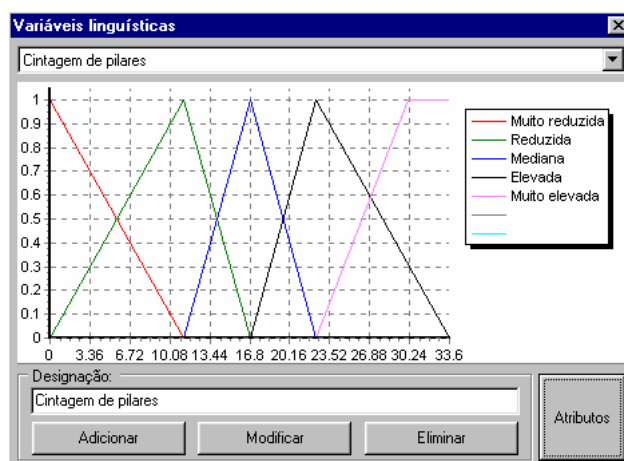


FIGURA 2 - Exemplo da definição de uma variável linguística.

A nossa percepção sobre o comportamento de sistemas físicos é baseada na experiência, na especialização, na intuição, no conhecimento da física do sistema, ou num conjunto de preferências e metas. Possuímos um conhecimento qualitativo de sistemas complexos e a um nível declarativo, baseado em termos linguísticos vagos, sendo esta situação designada por nível de conhecimento fuzzy de sistemas físicos. A forma mais simples do raciocínio fuzzy é

$$\begin{aligned} \text{Regra:} & \quad A \Rightarrow B \\ \text{Facto:} & \quad \underline{A'} \\ \text{Consequência:} & \quad B' \end{aligned}$$

em que A e A' são conjuntos fuzzy em X, B e B' são conjuntos fuzzy em Y, e a regra $A \Rightarrow B$ é traduzida na relação R em $X \times Y$, definida pela regra de implicação $\mu_{A \Rightarrow B}(x,y) = \mu_A(x) \rightarrow \mu_B(y)$ (Vadiei,1993; Mizumoto,1994).

O resultado de um sistema fuzzy é um conjunto fuzzy (ou mais), resultante da agregação das relações de implicação das regras fuzzy (conjuntos fuzzy). Para se obter um valor real, é necessário um processo de desfuzzyficação, normalmente recorrendo ao método do centro de gravidade do conjunto (figuras 3 e 4).

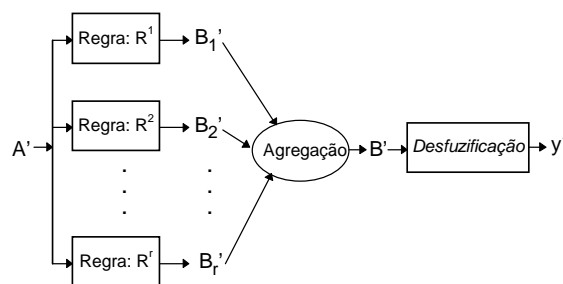


FIGURA 3 - Arquitectura de um sistema fuzzy.

A adopção da teoria de conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy, como forma de tratar, eficazmente, o cariz subjectivo que envolve muitos dos problemas da engenharia sísmica, tem vindo a ser sugerida, desde os finais dos anos setenta, por

muitos investigadores. São muitos os trabalhos, baseados na matemática *fuzzy*, sobre a análise da casualidade sísmica (Frangopol *et al.*, 1988; Deyi e Hchikawa, 1989; Hu e Chen, 1992; Shen e Yener, 1992) e na avaliação do risco sísmico em geral (Yao, 1980; Brown *et al.*, 1984; Bernardini e Modena, 1986; Dong e Shah, 1986; Souflis e Grivas, 1986; Kawamura *et al.*, 1992; Castaneda e Brown, 1994; Tatsumi *et al.*, 1994; Sato e Tatsumi, 1994; Song *et al.*, 1996 ; Ali, 1998 ; Estêvão, 1998 ; Revadigar e Mau, 1999).

Estêvão (1998), propôs o uso de um sistema *fuzzy* visando a determinação de um indicador de vulnerabilidade, que traduza o desvio ao valor médio da vulnerabilidade sísmica de uma dada tipologia de edifícios. Esse valor é obtido com o recurso ao programa FUZZYSIS (Estêvão, 1999), com base em informações de cariz qualitativo, nomeadamente na identificação de elos fracos no edifício (figuras 2 e 4).



FIGURA 4 - Exemplo do resultado de um sistema *fuzzy*.

4. Redes neuronais

Redes neuronais (redes neurais artificiais) são modelos cujas estruturas são baseadas no conhecimento actual do sistema nervoso biológico, nomeadamente no processo de aprendizagem do cérebro humano. As redes neuronais são redes que possuem elevada conectividade, em paralelo, de elementos de computação (os nós da rede, designados por neurónios artificiais) que tentam imitar o funcionamento das células cerebrais. Cada neurónio artificial processa um conjunto de sinais de entrada, num sinal de saída (figura 5). Associado a cada sinal de entrada x_i existem pesos w_i (amplitudes da ligação), imitando o processo químico que ocorre nas sinapses das redes biológicas, ajustando os sinais de entrada (Chapman e Crossland, 1995).

Os neurónios artificiais têm uma actividade α , produzindo um resultado na saída $y = f(\alpha)$, sendo $f(\alpha)$ a função de activação (funções monótonas não decrescentes, sendo muito adoptada a função sigmóide). O resultado y é,

normalmente, tomado como a soma ponderada dos sinais de entrada. Quando se deseja um limite de entrada, então é adicionado um peso w_0 (Ghaboussi *et al.*, 1991).

Uma rede neuronal funciona como uma caixa negra (que durante o treino, ajusta um hiperplano a um conjunto de dados, previamente conhecidos) processando um conjunto de dados nas entradas, em resultados nas saídas. A rede é caracterizada pela topologia, pelas características dos nós e pelas regras de aprendizagem e treino. O facto de se perder o controlo do processo, tem como contrapartida a vantagem de permitir resolver problemas para os quais não existem modelos fiáveis, dada a capacidade de aprendizagem e de generalização da rede.

As redes mais utilizadas em problemas relacionados com a engenharia sísmica, são as redes neuronais *Multilayer Feedforward*, treinadas com o algoritmo da retropropagação do erro.

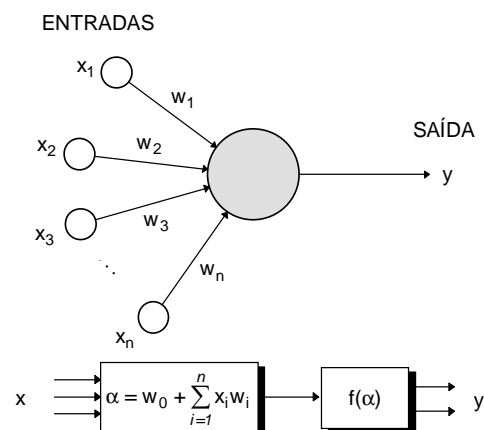


FIGURA 5 - Diagrama esquemático de um neurónio artificial (adaptado de Lippman, 1987; Patterson, 1996).

O uso de redes neuronais tem sido incrementado, nos últimos anos, acompanhado o desenvolvimento dos sistemas informáticos. As redes neuronais, treinadas com as medições *in situ* da resposta dos edifícios (acelerogramas e respectivas transformadas de Fourier), face à ocorrência de sismos, ou ao ruído ambiental, permitem identificar e estimar o nível de danos nesses edifícios em cenários pós-sismos (Elkordy *et al.*, 1993 ; Wu *et al.*, 1992 ; Chen *et al.*, 1995 ; Masri *et al.*, 1996).

Uma nova abordagem ao problema da simulação do comportamento histerético dos materiais (cíclico e não linear), consiste no treino de redes neuronais com dados de ensaios experimentais. São exemplo disso, os trabalhos de Ghaboussi *et al.* (1991) e Dias *et al.* (1997).

Com o crescente desenvolvimento dos modelos de análise não linear (integração passo a passo das equações de equilíbrio dinâmico), em detrimento das análises modais (lineares), surge a necessidade de gerar acelerogramas artificiais. As redes neuronais são uma nova solução ao problema, quer na obtenção dos acelerogramas (Ghaboussi e Lin, 1998), quer na estimativa das acelerações de pico,

com base na informação da sismicidade instrumental (Emami *et al.*, 1996).

Quando as estruturas são sujeitas às acções dos sismos, a forma convencional de garantir o bom funcionamento das estruturas, é minimizar os danos à custa de um correcto dimensionamento dos elementos estruturais. As regras desse dimensionamento são definidas em regulamentos específicos. Outra abordagem ao problema, que pelo seu elevado custo só se justifica em construções de grande importância, é efectuar um controlo activo da estrutura (com dispositivos mecânicos), de modo a minimizar os efeitos dos sismos. Alguns autores têm proposto a utilização de redes neuronais para controlo da resposta da estrutura (controlo das massas ou do amortecimento), em função dos valores das vibrações sísmicas, a cada instante (Tang, 1995 ; Bani-Hani e Ghaboussi, 1998).

Estêvão (1998) propôs o uso de uma rede neuronal para efectuar a correlação entre um indicador de vulnerabilidade (resultante do processamento da informação qualitativa, obtida de inquéritos a edifícios, por um sistema *fuzzy*) e as probabilidades de se atingirem determinados níveis de danos (Ps), obtidas de simulações numéricas (método de Monte Carlo) num elevado conjunto de edifícios, para treino da rede (figura 6).

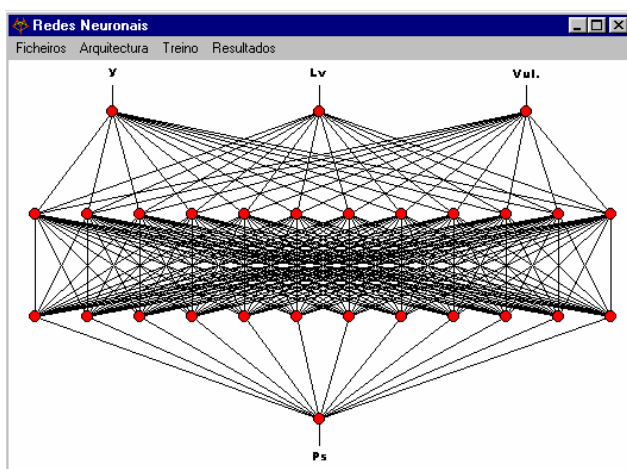


FIGURA 6 - Rede neuronal *Multilayer Feedforward*.

A rede do exemplo da figura 6, foi treinada (algoritmo da retropropagação do erro) com o auxílio do programa NEUNET (Estêvão, 1998), e permite correlacionar a aceleração de pico (y), a dimensão do edifício (Lv) e o indicador de vulnerabilidade (vul.), com a probabilidade Ps, para edifícios de uma dada tipologia (por cada tipo de solo, nº de pisos e características dos materiais).

5. Redes *fuzzy* neuronais

Rede *fuzzy* neuronal (figura 7) é definida como sendo uma rede neuronal que processa informação *fuzzy* e/ou apresenta pesos *fuzzy*, com algoritmos de aprendizagem adaptados a essa situação (Buckley e Hayashi, 1994).

A principal vantagem das redes *fuzzy* neuronais, é conjugarem o melhor das redes neuronais e dos sistemas *fuzzy* (baseados em regras), ou seja, possuem a capacidade de aprendizagem das redes neuronais mantendo o controlo do sistema através da transparência proporcionada pelas regras *fuzzy*.

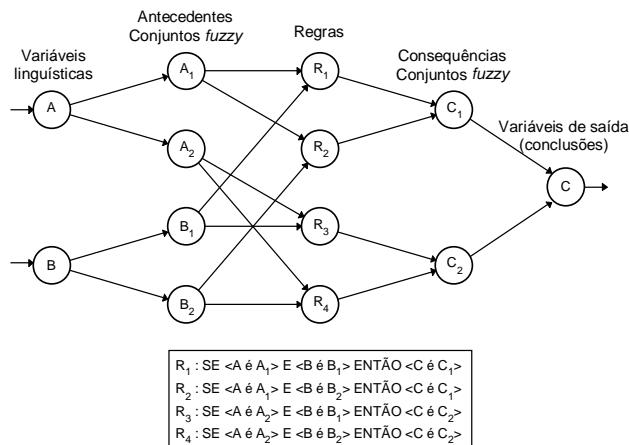


FIGURA 7 - Exemplo de uma rede *fuzzy* neuronal simples (adaptado de Patterson, 1996).

Nos últimos anos têm vindo a ser dados alguns passos na utilização de redes *fuzzy* neuronais aplicados à resolução de problemas da engenharia civil, nomeadamente na avaliação de danos (Rajasekaran *et al.*, 1996).

6. Conclusões

Não obstante somente terem sido dados os primeiros passos na inclusão dos métodos da inteligência artificial, na resolução dos diversos problemas com que se depara a engenharia sísmica, é de prever uma generalização do seu uso, a médio prazo, acompanhando o desenvolvimento dos sistemas informáticos.

Com a crescente preocupação mundial, em relação ao comportamento sísmico dos edifícios já edificados, surge a necessidade de desenvolver metodologias de avaliação do risco sísmico, em larga escala e com elevada fiabilidade. A inteligência artificial surge como mais uma hipótese para que, em conjunto com os modelos da mecânica estrutural, sejam possíveis realizar rápidas avaliações do risco sísmico de aglomerados habitacionais.

7. Referências bibliográficas

- ALI, M. A. (1998) - Utilizing fuzzy logic for seismic assessment of bridge piers. **In** Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema. Computer file.
- BANI-HANI, K. ; GHABOUSSI, J. (1998) - Nonlinear structural control using neural networks. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 124, nº 3, p. 319-327.
- BERNARDINI, A. ; MODENA, C. (1986) - The vulnerability of masonry buildings typologies in a seismic area. **In** Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Vol. 1, p. 2.3/57-64.
- BERRAIS, A. ; WATSON, A. S. (1993) - Expert systems for seismic engineering: the state of the art. *Engineering Structures*. Vol. 15, nº 3, p.146-154.

- BROWN, C. B. ; JOHNSON, J. L. ; LOFTUS, J. J. (1984) - Subjective seismic safety assessments. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 110, nº 9, p. 2212-2233.
- BUCKLEY, J. J. ; HAYASHI, Y. (1994) - Fuzzy neural networks. **In** YAGER, R. R. ; ZADEH, L. A. - Fuzzy sets, neural networks, and soft computing. New York: Van Nostrand Reinhold. p.233-249.
- CASTANEDA, D. ; BROWN, C. (1994) - Methodology for forensic investigations of seismic damage. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 120, nº 12, p. 3506-3524.
- CHAPMAN, J. V. ; CROSSLAND, A. D. (1995) - Neural networks in probabilistic structural mechanics. **In** SUNDARARAJAN, C. - Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and industrial applications. New York: Chapman & Hall. p. 317-330.
- CHEN, H. M. ; QI, G. Z. ; YANG, J. C. S. ; AMINI, F. (1995) - Neural network for structural dynamic model identification. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 121, nº 12, p. 1377-1381.
- CORSANEGO, A. ; DEL GROSSO, A. ; STURA, D. (1986) - Seismic vulnerability assessment for buildings: a Critical review of current methodologies. **In** Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Vol. 1, p.2.3/17-23.
- DEYI, F. ; ICHIKAWA, M. (1989) - Quantitative estimation of time-variable earthquake hazard by using fuzzy set theory. *Tectonophysics*. Vol. 169, nº 1-3, p. 175-196.
- DIAS, J. ; BENTO, J. ; NDUMU, D. (1997) - Aplicações de redes neuronais à análise sísmica de estruturas. **In** 3º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Lisboa: Instituto Superior Técnico. p.267-276.
- DONG, W. ; SHAH, H. C. (1986) - Approximate reasoning for evaluating seismic risk. **In** Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Vol. 1, p. 2.4/39-46.
- ELKORDY, M. F. ; CHANG, K. C. ; LEE, G. C. (1993) - Neural networks trained by analytically simulated damage states. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 7, nº 2, p.130-145.
- EMAMI, S. M. R. ; HARADA, T. ; IWAO, Y. (1996) - Prediction of peak horizontal acceleration using an artificial neural network model. *Structural Engineering / Earthquake Engineering*. Vol.13, nº 2, p. 123S-129S.
- ESTÊVÃO, J. M. C. (1998) - Modelo computacional de avaliação do risco sísmico de edifícios. Lisboa: IST, Universidade Técnica de Lisboa. Dissertação de mestrado.
- FRANGOPOL, D. M. ; IKEJIMA, K. ; HONG, K. (1988) - Seismic hazard prediction using a probabilistic-fuzzy approach. *Structural Safety*. Vol. 5, nº 2, p. 109-117.
- GAVARINI, C. (1992) - Toward the systematic use of expert systems in seismic risk reduction. **In** Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema. Vol. 10, p.6297-6302.
- GHABOUSSI, J. ; GARRETT Jr., J. H. ; WU, X. (1991) - Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 117, nº 1, p.132-153.
- GHABOUSSI, J. ; LIN, C-C. J. (1998) - New method of generating spectrum compatible accelerograms using neural networks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Vol. 27, nº 4, p. 377-396.
- HADIPRIONO, F. C. (1995) - Fuzzy sets in probabilistic structural mechanics. **In** SUNDARARAJAN, C. - Probabilistic Structural Mechanics Handbook: Theory and industrial applications. New York: Chapman & Hall. p. 280-316.
- HU, Y. ; CHEN, H.-Y. (1992) - Probabilistic analysis of uncertainties in seismic hazard assessment. *Structural Safety*. Vol. 11, nº 3-4, p. 245-253.
- HU, Y.-X. ; LIU, S.-C. ; DONG, W. (1996) - Earthquake engineering. London: E & FN Spon.
- KAWAMURA, H. ; TANI, A. ; KAMBARA, H. (1992) - Aseismic structural planning system by fuzzy network. **In** Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema. Vol. 10, p. 6271-6275.
- KRUSE, R. ; GEBHARDT, J. ; KLAWONN, F. (1994) - Foundations of fuzzy systems. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- LIPPMAN, R. P. (1987) - Introduction to computing with neural nets. *IEEE Acoustic, Speech, and Signal Processing Magazine*. (April), p.4-22.
- MASRI, S. F. ; NAKAMURA, M. ; CHASSIAKOS, A. G. ; CAUGHEY, T. K. (1996) - Neural network approach to detection of changes in structural parameters. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol.122, nº4, p.350-360.
- MIZUMOTO, M. (1994) - Multifold fuzzy reasoning as interpolative reasoning. **In** YAGER, R. R. ; ZADEH, L. A. - Fuzzy sets, neural networks, and soft computing. New York: Van Nostrand Reinhold. p.188-193.
- PATTERSON, D. W. (1996) - Artificial neural networks: theory and applications. Singapore: Simon & Schuster (Asia) Pte Ltd.
- PAYNE, C. ; McARTHUR, R. C. (1990) - Developing expert systems: a knowledge engineer's handbook for rules & objects. New York: John Wiley & Sons Inc..
- RAJASEKARAN, S. ; FEBIN, M. F. ; RAMASAMY, J. V. (1996) - Artificial fuzzy neural networks in civil engineering. *Computers & Structures*. Vol. 61, nº 2, p. 291-302.
- REVADIGAR, S. ; MAU, S. T. (1999) - Automated multicriterion building damage assessment from seismic data. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 125, nº 2, p. 211-217.
- SALVANESCHI, P. ; CADEI, M. ; LAZZARI, M. (1997) - A causal modelling framework for the simulation and explanation of the behaviour of structures. *Artificial Intelligence in Engineering*. Vol. 11, p. 205-216.
- SATO, Y. ; TATSUMI, Y. (1994) - Verification of a seismic damage evaluation system. **In** Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design. Rotterdam: A. A. Balkema. Vol. 2, p. 1063-1070.
- SHEN, H. ; YENER, M. (1992) - Fuzzy evaluation and statistical analysis of site intensity. **In** Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema. Vol. 1, p. 399-403.
- SONG, B. ; HAO, S. ; MURAKAMI, S. ; SADOHARA, S. (1996) - Comprehensive evaluation method on earthquake damage using fuzzy theory. *Journal of Urban Planning and Development*. Vol. 122, nº 1, p.1-17.
- SOUFLIS, C. ; GRIVAS, D. A. (1986) - Fuzzy set approach to linguistic seismic load and damage assessments. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 112, nº 6, p. 605-618.
- TANG, Y. (1996) - Active control of SDF systems using artificial neural networks. *Computers & Structures*. Vol. 60, nº 5, p. 695-703.
- TATSUMI, Y. ; SATO, Y. ; NAGANO, M. (1994) - Some discussion on seismic risk management. **In** Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Resistant Construction and Design. Rotterdam: A. A. Balkema. Vol. 2, p.1031-1038.
- THURSTON, H. M. (1990) - Seismic damage evaluation of tilt-up buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 4, nº 4, p.349-369.
- VADIEE, N. (1993) - Fuzzy rule-based expert systems I. **In** Fuzzy logic and control: Software and hardware applications. New Jersey: PTR Prentice Hall Inc.. p. 51-85.
- WU, X. ; GHABOUSSI, J. ; GARRETT Jr., J. H. (1992) - Use of neural networks in detection of structural damage. *Computers & Structures*. Vol. 42, nº 4, p. 649-659.
- YAO, J. T. P. (1980) - Damage assessment of existing structures. *Journal of Engineering Mechanics Division*. Vol. 106, nº EM4, p. 785-799.