

7

Considerações Finais

7.1

Introdução

Diversos estudos foram realizados para a avaliação de previsão da carga última de vigas de aço sujeitas a cargas concentradas, contudo, as fórmulas existentes ainda fornecem erros superiores a 40%. A dificuldade de geração de novos dados experimentais e o tempo envolvido em uma análise por elementos finitos também contribuem para que a influência real de cada um dos parâmetros envolvidos no cálculo da carga última ainda permaneça pouco conhecida até o presente momento.

Embora este erro seja aceitável para problemas de engenharia civil, onde a variabilidade dos parâmetros envolvidos é muito grande e a própria divergência entre resultados práticos e experimentais atinge valores superiores a 10%, as novas técnicas de inteligência computacional, onde se inserem as redes neurais, os algoritmos genéticos e a lógica nebulosa, demonstraram a possibilidade de uma redução substancial deste erro.

Os resultados apresentados no capítulo 4 e em (Fonseca, 1999) demonstraram que as redes neurais possuem uma grande capacidade de previsão da carga última e uma boa generalização. No entanto, a divisão dos dados experimentais de treinamento em três classes foi feita pela magnitude da carga e não de acordo com o fenômeno físico associado. Isto tende a provocar distorções na avaliação da carga última, pois vigas com um mesmo valor de carga crítica podem representar fenômenos físicos diferentes. Além disso, a análise paramétrica da carga crítica apresentada em (Fonseca, 1999) estava limitada aos dados das faixas 1 e 2 (carga máxima de 250 kN) e nenhuma avaliação da variação do fenômeno físico havia sido desenvolvida.

A tese é a continuação desta pesquisa com o objetivo de propor um sistema de avaliação do comportamento estrutural de cargas concentradas, através de uma identificação da influência dos diversos parâmetros na carga e nos tipos de comportamento resultantes (plastificação, enrugamento e flambagem global), estabelecendo limites mais flexíveis entre cada um destes. Esta análise foi

executada empregando um sistema neuro-fuzzy (híbrido de redes neurais e de lógica nebulosa). Este trabalho também apresenta um estudo de otimização das fórmulas de projeto existentes empregando algoritmos genéticos.

As principais conclusões da utilização de técnicas de inteligência computacional na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço submetidas a cargas concentradas são apresentadas a seguir.

7.2 Conclusões

7.2.1 Algoritmos genéticos

Apesar dos algoritmos genéticos terem gerado uma fórmula otimizada com erros inferiores aos apresentados pelas fórmulas de projeto existentes, deve-se ressaltar que a fórmula é empírica. Ainda assim, apesar das restrições impostas na forma, a fórmula obtida com os algoritmos genéticos atingiu resultados satisfatórios para confirmar as vantagens da utilização de uma única fórmula de projeto que estabeleça limites mais graduais entre os comportamentos estruturais. Ainda que os erros encontrados tenham sido superiores aos fornecidos pelas redes neurais apresentadas em (Fonseca, 1999), eles foram inferiores aos fornecidos pelas fórmulas tradicionais de dimensionamento, mesmo quando uma única fórmula para todos os tipos de viga foi adotada. O erro máximo (30,45%) foi inferior a todas as outras fórmulas (85,19% na equação 2.12), confirmando a possibilidade futura de criação de uma fórmula de projeto com redução dos fatores de segurança necessários à engenharia estrutural.

7.2.2 Treinamento do Sistema neuro-fuzzy

A primeira solução proposta foi empregar, de acordo com a classificação do sistema neuro-fuzzy, uma rede neural diferente para prever a carga esperada para vigas sujeitas a cada comportamento. A carga final de cada viga seria então a soma ponderada do resultado de cada uma destas redes, utilizando os graus de ativação como pesos do somatório. Para isso, foram avaliados os dados de cargas concentradas existentes com relação ao fenômeno ocorrido.

Considerando a pequena concentração de dados da terceira classe (plastificação), o modelo proposto precisou ser reformulado, pois a pequena quantidade de dados desta classe não permitiria o treinamento de uma rede de previsão específica. Sendo assim, foi adotado um modelo com um sistema de classificação neuro-fuzzy e uma única rede neural de previsão, utilizando como entradas os graus de ativação gerados pelo sistema neuro-fuzzy.

Para treinar o sistema neuro-fuzzy de classificação foram utilizados os dados apresentados no Anexo A e os perfis laminados do anexo C. Estes perfis foram necessários como uma base de dados de plastificação e selecionados por serem compactos e não apresentarem problemas relacionados à instabilidade. As tensões limite de escoamento adotadas foram de 250 MPa com comprimento carregado de 5 mm e fator de forma do painel de alma (a/h) de 3, correspondendo às condições mais desfavoráveis para a estabilidade dos perfis, garantindo que, mesmo nos piores casos de carregamento, estas vigas não apresentariam problemas de instabilidade.

Algumas das conclusões mais relevantes desta abordagem foram:

- a adoção de valores iguais de tensões limite de escoamento para a maioria dos dados da terceira classe fez o sistema aprender erroneamente que este valor era muito significativo para a classificação. Assim, os perfis foram repetidos com tensões limite de escoamento de 350 MPa, fator de forma do painel de alma (a/h) igual a 1 e um comprimento carregado c igual a um quarto da altura da viga;
- o número de regras criadas pelo sistema está diretamente relacionado à capacidade de generalização e à complexidade da iteração entre parâmetros de cada fenômeno estudado. A taxa de decomposição de regras do programa foi um fator importante para o equilíbrio entre o aprendizado e a generalização;
- a esbeltez e o parâmetro B definido pela equação 2.14 se mostraram importantes na determinação do fenômeno físico, uma vez que a utilização destes parâmetros como novas entradas melhorou o desempenho do sistema;

- a apresentação dos dados intermediários ao sistema duas vezes, tendo em cada uma um fenômeno físico diferente como saída, melhorou o treinamento, facilitando o aprendizado dos limites mais graduais entre os fenômenos físicos.

7.2.3

Treinamento da Rede Neural de Previsão da Carga Última

Para o treinamento e validação da rede foram utilizados, como dados de entrada, os parâmetros geométricos e de material e os graus de ativação. Como saída foi utilizada a carga última. Os dados utilizados no treinamento são apresentados no anexo A.

Os dados experimentais com espessura de alma de 0,99mm foram descartados do conjunto de treinamento, devido à dificuldade da realização de ensaios experimentais de perfis com estas características geométricas. Este procedimento reduziu o erro percentual máximo significativamente, excluindo dados excessivamente ruidosos que tendiam a prejudicar o treinamento.

A utilização da esbeltez, da fórmula de Roberts (2.12) e do parâmetro B definido pela equação 2.14 como entradas melhoraram o aprendizado da rede neural de previsão, mostrando que a apresentação direta de parâmetros combinados tende a melhorar o desempenho das redes neurais em problemas com poucos dados e grande quantidade de parâmetros.

Apesar da pequena quantidade de dados experimentais disponíveis para o treinamento da rede neural, os erros de previsão se mostraram inferiores aos fornecidos pelas fórmulas de projeto existentes. A fórmula de Roberts, no entanto, quando comparada às outras fórmulas, se mostrou a mais adequada aos dados experimentais empregados neste trabalho.

7.2.4

Análise Paramétrica do Fenômeno Físico

A avaliação do sistema neuro-fuzzy foi feita a partir da coerência dos graus de ativação em função da variação dos parâmetros envolvidos quando comparados à literatura. Deve-se lembrar que outra forma de investigação não é possível, posto que um estudo comportamental mais gradual dos três fenômenos físicos envolvidos é ainda inédito. Os principais resultados da análise paramétrica do

fenômeno físico são apresentados a seguir, onde se verificam a confirmação e um maior detalhamento de diversas hipóteses teóricas:

- em almas mais esbeltas a flambagem é dominante, enquanto a plastificação é mais evidente em almas mais espessas ou quando as mesas são mais rígidas;
- o enrugamento é mais comum em vigas de mesas mais flexíveis (Bergfelt, 1971);
- a variação da largura da mesa é pouco significativa (Roberts & Rockey, 1978);
- em mesas mais finas, a largura da mesa aumenta ligeiramente a ocorrência de enrugamento, diminuindo a ocorrência de flambagem, para cargas em um comprimento carregado menor, e as chances de plastificação em comprimentos carregados maiores;
- uma altura maior diminui as chances de plastificação e aumenta os problemas de instabilidade, principalmente o grau de ativação de enrugamento em mesas mais estreitas e almas mais finas;
- a espessura da mesa exerce grande influência no fenômeno físico (Graciano, 2003), principalmente em cargas com um comprimento carregado menor;
- o aumento do comprimento carregado ajuda na distribuição da carga na alma, reduzindo os graus de ativação de plastificação e aumentando a probabilidade de problemas de instabilidade. No entanto, em vigas de mesa mais fina, este aumento da relação c/h também reduz a probabilidade de enrugamento e as chances de flambagem aumentam consideravelmente.
- em vigas de mesas mais finas e comprimentos carregados maiores, a flambagem predomina, enquanto para cargas mais concentradas, a plastificação da região é o fenômeno dominante;
- um comprimento carregado maior em almas mais finas aumenta as chances de flambagem global, pois aumenta a distribuição

da carga em uma área de alma maior, reduzindo a plastificação e o enrugamento;

- a variação da espessura da mesa é menos significativa para o fenômeno físico em vigas de comprimentos carregados maiores e grandes alturas (mais esbeltas), onde a flambagem global predomina;
- o aumento da altura e conseqüente aumento da esbeltez também favorecem a flambagem global;
- em vigas de almas e mesas mais espessas e carga mais distribuída, o aumento da altura aumenta ligeiramente o grau de ativação de plastificação;
- o fator de forma a/h exerce pouca influência no fenômeno físico, no entanto esta influência tende a ser mais significativa em mesas mais finas, almas mais esbeltas e comprimentos carregados menores. Nestes casos os graus de ativação de plastificação diminuem com o aumento da distância entre os enrijecedores, enquanto os de flambagem aumentam ligeiramente devido ao aumento da área de instabilidade;
- os graus de ativação de enrugamento não apresentaram grandes alterações em função do fator de forma, por ser este um fenômeno localizado. A influência do fator de forma só é relevante em perfis de espessuras de mesa e de alma reduzidas;

7.2.5

Análise Paramétrica da Carga Crítica

As principais conclusões da análise paramétrica da carga crítica são apresentadas a seguir:

- a influência da espessura da mesa na carga é maior em vigas de almas mais espessas;
- nos casos de plastificação há uma tendência da carga a continuar subindo com o aumento da espessura da mesa, enquanto que para os outros casos a carga tende a se estabilizar a partir de valores mais significativos desta espessura;

- nas vigas mais esbeltas e de almas mais finas a influência da espessura da mesa se mostra menor;
- um aumento na largura da mesa aumenta ligeiramente a carga crítica das vigas;
- em todos os casos a espessura da mesa aumenta ligeiramente o valor da carga, no entanto, verifica-se que em almas mais finas a altura se torna mais significativa que a espessura da mesa para comprimentos carregados maiores, enquanto em almas mais espessas a altura e a espessura da mesa se tornam mais importantes em comprimentos carregados menores;
- o aumento da altura da viga implica diretamente no aumento da esbeltez, mas também influi na redução do fator de forma do painel de alma (a/h) e da relação entre o comprimento carregado e a altura (c/h), ocasionando grandes variações no fenômeno físico. Isto também explica a não-linearidade do decréscimo da carga em função do aumento da altura;
- em vigas de alma e mesas mais espessas, o aumento da altura aumenta o momento de inércia e conseqüentemente a carga crítica;
- o aumento da altura provoca uma redução da capacidade de carga quando as almas são mais finas (maior esbeltez);
- o aumento do fator de forma provoca uma pequena redução da carga crítica, que tende a ser mais significativa para fatores de forma entre 1 e 2;
- há um aumento da carga em função do aumento do comprimento carregado, mais significativo para relações c/h menores (0,1 a 0,3) e mesas mais espessas;
- em todas as análises, a variação da carga é mais significativa para comprimentos carregados (c) menores e fatores de forma do painel de alma (a/h) menores.

7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho mostrou a validade da utilização das técnicas de inteligência computacional como ferramentas de estudo dos diversos problemas de engenharia civil. É importante ressaltar que a confiabilidade destes resultados aumenta na medida em que a razão entre o número de dados experimentais disponíveis pelo número de parâmetros envolvidos aumenta.

Na impossibilidade de se adotar um número significativo de dados experimentais, a geração de novos dados deverá ser feita considerando os limites impostos pela faixa de parâmetros usada no conjunto de treinamento.

O estudo da utilização de algoritmos genéticos na geração de uma nova fórmula de projeto poderá prosseguir com a utilização de um programa de regressão simbólica que tende a melhorar ainda mais os resultados, garantindo maior liberdade na geração de uma nova fórmula. Deve-se considerar também a possibilidade da utilização dos valores de carga fornecidos pelas redes neurais para a evolução de fórmulas por algoritmos genéticos e um estudo da sensibilidade das fórmulas geradas.

Apesar dos bons resultados obtidos pelo sistema neuro-fuzzy adotado, o número de dados experimentais disponível para treinamento e testes é muito pequeno para garantir a maior precisão deste método. Para uma melhor validação deste estudo deve ser feita uma comparação adicional entre os resultados previstos pelo sistema e novos resultados experimentais.

Um outro sistema deste tipo pode ser empregado para investigar outros casos de cargas concentradas em vigas de aço, como as cargas atuando em duas mesas opostas, a iteração com o cisalhamento, a flexão e os esforços normais, os efeitos de excentricidade da carga e a utilização de enrijecedores longitudinais.

Fica claro que a proposta atual não pretendia esgotar todos os passos para a avaliação do fenômeno de cargas concentradas em vigas de aço, mas apresentar uma nova abordagem para a compreensão do problema, que tende a gerar conclusões inovadoras para um problema que vem sendo exaustivamente estudado pelos métodos tradicionais.