

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Introdução

Este Capítulo atualiza a revisão bibliográfica apresentada na dissertação de mestrado (Fonseca, 1999), apresentando as contribuições mais recentes relacionadas ao fenômeno de cargas concentradas. Diversos trabalhos teóricos, numéricos e experimentais foram desenvolvidos para a avaliação do problema de instabilidade devido a cargas concentradas em almas de vigas de aço. Um resumo de grande parte destas pesquisas com suas principais conclusões e resultados é apresentado na Tabela 2.1. As soluções mais relevantes para este problema são apresentadas a seguir com maior profundidade.

2.2

Trabalhos sobre Cargas Concentradas

Um dos primeiros trabalhos experimentais sobre o assunto foi desenvolvido por Lyse & Godfrey (1935). Foram identificadas as razões para o colapso da viga e observado um problema de instabilidade local da alma, enrugamento, a partir de testes em 6 perfis laminados com esbeltez da alma h/t_w em torno de 52. Em função das altas tensões observadas nos testes, foi concluído que a plastificação foi um efeito localizado. A equação 2.1 foi proposta para modelar o fenômeno e ainda é a base de projeto de diversas normas de outros países (Vellasco, 1992). Esta fórmula é baseada em uma distribuição da carga na alma em um ângulo de 45° , gerando a plastificação da mesma:

$$\sigma_{crit} = \frac{P}{t_w(c + 2t_f)} \leq \sigma_y \quad (2.1)$$

onde: σ_{crit} é a Tensão crítica;

P é a Carga aplicada;

t_w é a Espessura da alma;

t_f é a Espessura da mesa;

c é o Comprimento de aplicação da carga;

σ_y é a Tensão limite de escoamento da alma.

Esta fórmula, no entanto, não considera a instabilidade provocada pelas características geométricas do elemento estrutural, que pode gerar problemas de flambagem ou de “enrugamento” da alma, como foi definido no Capítulo 1. Sua utilização envolve apenas o estado limite de plastificação em uma área da alma relativamente pequena.

Em 1955, Zetlin estudou o problema de flambagem em placas retangulares para propor uma solução simples baseada em gráficos. Os resultados foram comparados a ensaios experimentais. Foram encontradas incoerências que foram atribuídas às diferenças entre os casos teóricos e os testes e a não consideração da resistência pós-flambagem na análise.

Dentro dos estudos do fenômeno de instabilidade deve-se destacar as pesquisas desenvolvidas por Bergfelt. Em 1968, Bergfelt & Hovik examinaram o problema em almas esbeltas não enrijecidas e foi mostrado que uma das vantagens deste método de projeto era a redução de pintura e manutenção pela não utilização dos enrijecedores. Também foi investigada a influência de enrijecedores intermediários na resistência última da viga, mostrando que a altura do enrijecedor é um fator importante e que se este fosse perfeitamente ajustado à alma, um limite superior para a resistência seria obtido. Foi concluído que a viga tem uma grande resistência pós-crítica quando submetida a cargas concentradas. Uma série de testes demonstrou que alguns fatores como a altura da viga, a dimensão das mesas e o vão não-enrijecido têm uma influência secundária na carga de ruína, confirmando os resultados de Granholm (1960), que demonstram que a espessura da alma é o seu fator mais relevante. Granholm propôs a equação 2.2 para previsão da carga última:

$$P_f = 0.045Et_w^2 \quad (2.2)$$

onde P_f é a Carga última da viga.

Bergfelt (1971) executou uma nova série de testes e concluiu que o colapso da alma pode ser dividido em três estados limites: plastificação, flambagem da alma, e enrugamento da alma, examinando este último caso com mais detalhe. Os

testes foram executados em vigas com esbeltez da alma entre 150 e 350 e com espessuras da alma entre 2 e 6 mm. A influência da espessura da alma está apresentada na Figura 2.1.

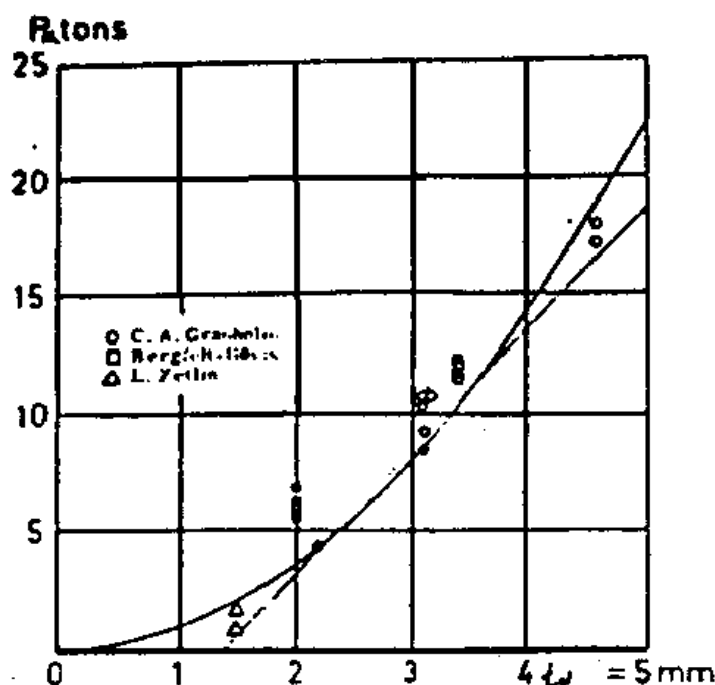


Figura 2.1- Influência da Espessura da Alma na Carga de Ruína. (Bergfelt, 1971).

As investigações experimentais de Granholm (1960), Zetlin (1955), e Bergfelt & Hovik (1968), foram então comparadas com a equação 2.2, e mostraram coerência. Foi sugerida a equação 2.3 para vigas com mesas mais espessas onde o enrugamento governa:

$$P_f = 0.045Et_w^2(0.55 + 0.22t_f/t_w) \quad (2.3)$$

onde: E é o Módulo de Elasticidade.

Ainda em 1971, Skaloud & Novak realizaram alguns ensaios com cargas estáticas e cíclicas e concluíram que a rigidez da mesa tem grande influência na resistência última da viga e verificaram que as vigas têm uma grande resistência pós-flambagem.

Em 1975, Skaloud & Drdacky ensaiaram vigas com esbeltez de alma entre 200 e 400 e verificaram que o colapso ocorre geralmente a um terço da altura da viga, próximo à mesa carregada.

Bergfelt (1976) prosseguiu seus estudos descrevendo o processo de ruína de uma viga sujeita a uma carga concentrada em três fases principais. A primeira até a alma começar a escoar. A segunda quando algumas pequenas dobras podem ser vistas na alma e a última fase daí até o colapso. Este colapso pode ser alcançado por uma flambagem global da alma ou por enrugamento. Ele sugeriu uma mudança na equação 2.2, incluindo outros parâmetros como a tensão limite de escoamento e as dimensões da mesa, a despeito de suas primeiras conclusões em 1968.

$$P_f = 13\eta t_i t_w \sigma_y \quad (2.4)$$

$$\text{onde: } t_i = t_f \sqrt[4]{\frac{b_f}{25t_f}};$$

b_f é a largura da mesa;

e η é um fator que varia com t_i/h .

A interação entre carga concentrada e momento fletor também foi estudada (Bergfelt, 1976) e ficou provado que esta só é importante em casos onde a relação entre o momento aplicado e o momento último M/M_u é maior que 0,6. As fórmulas 2.5 e 2.6 foram sugeridas para modelar esta interação. A equação 2.6 pareceu ser mais precisa quando comparada à série de testes.

$$\frac{P}{P_f} = \sqrt{1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{P}{P_f} = \sqrt[8]{1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^2} \quad (2.6)$$

onde P é a carga aplicada;

e P_f é a carga última.

Drdacky & Novotny (1977), ensaiaram vigas com esbeltez de alma entre 75 e 200 e confirmaram as conclusões de Skaloud & Drdacky (1975), de que o colapso ocorre geralmente a um terço da altura da viga.

Em 1979, Bergfelt observou a influência de enrijecedores horizontais e verticais na ruína e continuou o seu estudo, avaliando os parâmetros que mais influenciam o problema, como o tipo do aço, a influência de enrijecedores, a altura da alma e a interação carga/momento. As principais vantagens da redução do espaço entre os enrijecedores verticais foram a limitação da área de flambagem na alma e o suporte dado à mesa carregada. As vantagens de usar enrijecedores longitudinais podem ser vistas, de forma simplista, como uma diminuição da altura da alma, o que aumenta a capacidade de carga da viga. Baseado nestes estudos, Bergfelt desenvolveu a equação 2.7:

$$P_f = 0.8t_w^2 \sqrt{E\sigma_y^w \left(\frac{t_i}{t_w} \right)} f^* \quad (2.7)$$

onde σ_y^w é a tensão limite de escoamento da alma e

$$f^* = f_c f_h f_{\sigma_y^w} f_{\sigma_b} f_{\delta} f_{vs} f_{hs}$$

e a influência do comprimento carregado c na carga ultima é indicado em (2.7.a):

$$f_c = 1 + \frac{40ct_w}{ah} \quad (2.7.a)$$

onde a é a largura do painel de alma.

A influência da altura da alma é na maioria dos casos igual a 1, mas para vigas onde a relação h/t_w está entre 200 e 400, ela pode ser calculada com auxílio da equação (2.7.b):

$$f_h = \sqrt{\frac{350t_w}{h}} \quad (2.7.b)$$

A influência da tensão limite de escoamento da alma σ_y^w é apresentada na equação (2.7.c):

$$f_{\sigma_y^w} = \sqrt[6]{\frac{700\sigma_y^w}{E}} \quad (2.7.c)$$

A redução da carga de ruína em função da coexistência de momento fletor f_{σ_b} é expressa pela equação (2.7.d), que é uma simplificação da fórmula 2.6:

$$f_{\sigma_b} = \sqrt[8]{1 - \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_y^{fl}} \right)^2} \quad (2.7.d)$$

onde σ_b é a tensão de flexão;

e σ_y^{fl} é a tensão limite de escoamento da mesa.

A influência das imperfeições iniciais da alma para vigas com t_f/t_w maior que dois são expressas na equação (2.7.e):

$$f_{\delta} = 1 - 15(\delta_i - 0.001t_f h/t_w)/h; \quad 0.8 \leq f_{\delta} \leq 1 \quad (2.7.e)$$

onde δ_i é a imperfeição inicial.

A contribuição da mudança de espaçamento dos enrijecedores verticais é descrita em (2.7.f):

$$f_{vs} = \frac{2a}{L} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + K \left(\frac{L}{2a} \right)^4}}{1 + \sqrt{1 + K}}} \quad (2.7.f)$$

onde K é um parâmetro que varia com a relação t_f/t_w ;

e L é o vão livre da viga.

E a influência dos enrijecedores longitudinais é apresentada na equação (2.7.g):

$$f_{hs} \cong 1 + (1/3 - s/h) \sqrt{\frac{a}{3s}} \quad (2.7.g)$$

onde s é a distância entre o enrijecedor e a mesa carregada.

Em um artigo posterior, Bergfelt (1983) confirmou que a altura da viga, h, tem pouca influência na carga última para vigas com esbeltez de alma h/t_w maior

que 150. Ele concluiu que para as vigas analisadas com uma razão b_f/t_f maior que 12, a largura da mesa b_f tem um papel secundário na carga última. Bergfelt também estudou os efeitos dos enrijecedores horizontais na capacidade de carga da viga e concluiu que a maior vantagem da utilização destes era a modificação da configuração de flambagem da alma, como já verificado em (Bergfelt, 1979).

Entre as pesquisas mais relevantes encontram-se os trabalhos de Roberts. Em 1978, Roberts & Rockey criaram um método para prever a resistência de carga última baseado em um mecanismo de rótulas plásticas mostrado na Figura 2.2. Usando o teorema dos trabalhos virtuais eles desenvolveram a seguinte equação:

$$P_f = \frac{4M_{fl}}{\beta} + \frac{4\beta M_w}{\alpha \cos \theta} + \frac{2cM_w}{\alpha \cos \theta} - \frac{2\Omega M_w}{\alpha \cos \theta} \quad (2.8)$$

$$\text{onde } M_w = \frac{\sigma_y^w t_w^2}{4};$$

$$M_{fl} = \frac{\sigma_y^f b_f t_f^2}{4}; \quad \text{e}$$

$$\Omega = \frac{(4\beta + 2c)M_w}{\left(\frac{2M_w}{\alpha \cos \theta} + \sigma_y^w\right)\alpha \cos \theta}$$

α , β e θ são definidos na Figura 2.2.

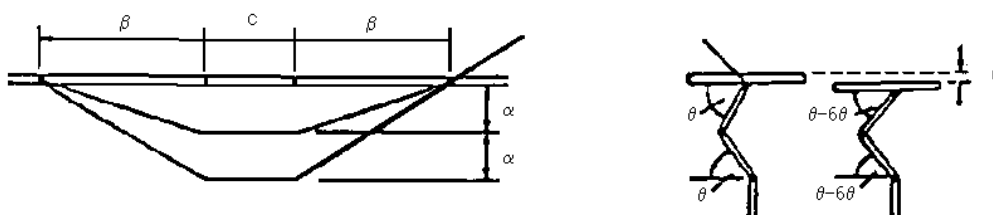


Figura 2.2- Mecanismo de Colapso Proposto por Roberts & Rockey. (Roberts & Rockey, 1978).

Esta expressão provou estar próxima dos resultados experimentais de Bergfelt & Hovik (1968), e Skaloud & Novak (1971). Isto pode ser visto na Figura 2.3, onde os resultados dos testes para vigas com esbeltez da alma variando entre 150 e 400, são comparados com os resultados da equação 2.8. Também foi verificado que a largura da mesa tem uma influência pequena na carga última.

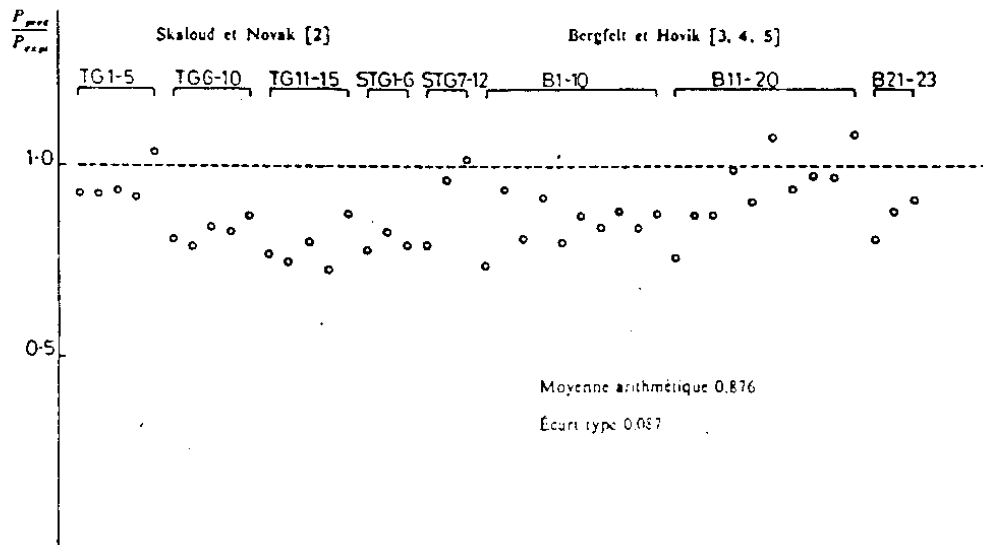


Figura 2.3 – Comparação da Equação 2.8 com Resultados Experimentais. (Roberts & Rockey, 1978).

Roberts (1981), fez uma nova série de testes para estudar a influência das dimensões da mesa e da altura da alma na capacidade de carga última da viga. Estes testes confirmaram que a carga última era proporcional ao quadrado da espessura da alma e com menor intensidade, proporcional à espessura da mesa. Mostraram também que a altura da alma tem pequena ou nenhuma influência na carga última. Um método de projeto foi proposto a partir do teste de duas equações e adoção do menor valor. A primeira equação é uma modificação da equação 2.8:

$$P_f = 0.5t_w^2 \sqrt{E\sigma_y \frac{t_f}{t_w}} \left[1 + \left(\frac{3c}{h} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{3/2} \right] \quad (2.9)$$

Esta equação incorporou a influência do comprimento uniformemente carregado c . Recomendaram que o valor de c/h seja limitado a 0.2, pois esta fórmula tende a subestimar o valor da carga de ruína de vigas com almas e mesas muito finas. Esta foi a razão para o estabelecimento de um limite mínimo de três para a razão t_f/t_w .

Para vigas com almas mais espessas, outro estado limite controla o processo de ruína. Nestes casos predomina a plastificação direta da alma e o mecanismo de

colapso muda. Usando o teorema dos trabalhos virtuais novamente gera-se a equação 2.10:

$$P_f = \left(\frac{4M_f}{\beta} \right) + \sigma_y^w t_w (\beta + c) \quad (2.10)$$

Por uma minimização da carga foi obtida uma expressão para o valor de β .

$$\beta^2 = 4(M_f / \sigma_y^w) t_w \quad (2.11)$$

Uma comparação foi feita entre este método de projeto e resultados de testes experimentais desenvolvidos por Skaloud & Novak (1972), Bergfelt & Hovik (1976), Drdacky & Novotny (1977), e Bergfelt (1979). A média aritmética para os valores de P_{exp}/P_f foi de 1,42 com um desvio padrão de 15,3% mostrando que o procedimento de projeto é conservador.

Outra série de testes de vigas foi desenvolvida por Roberts & Markovic (1983), e incluiu almas com espessura variando entre 3 e 10 mm e valores de espessura da alma variando entre 50 e 166. Estes testes foram comparados então com o método de Roberts e com os propostos por Granholm (1960), Bergfelt (1976), e Skaloud & Drdacky (1975). Roberts afirmou que os resultados dos últimos três eram bem parecidos com os resultados da equação 2.9. Mais tarde ele concluiu que o método proposto era muito conservador em relação a vigas com almas mais espessas e sugeriu que em vez de usar o mínimo das equações 2.9 e 2.10, a equação 2.9 deveria ser usada em todas as situações, sendo a equação 2.10 apenas um limite de serviço para a viga na fase não-linear.

Roberts & Coric (1988), continuaram o trabalho e sugeriram outra modificação para a equação 2.9 a partir da comparação de resultados experimentais com os resultados da fórmula. Foi mostrado que se um fator de 0,77 fosse usado em vez do 0,5 presente naquela equação, os resultados estariam mais próximos do experimental, reduzindo a razão média da carga experimental pela carga prevista de 1,54 para 1. Também foi investigada a influência da interação carga/momento e recomendada uma fórmula bem parecida com a equação 2.5.

Um estudo recente desenvolvido por Roberts & Newark (1997) transforma as soluções por mecanismos em equações mais simples. Foi desenvolvida uma equação para prever o enrugamento da alma em apoios de extremidade. Uma equação simplificada para o cálculo da carga de flambagem da alma em perfis I é apresentada abaixo:

$$P_f = \left[1.1 t_w^2 (E \sigma_y)^{0.5} \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^{0.25} \left(1 + \frac{c_e t_w}{h t_f} \right) \right] \frac{1}{F} \quad (2.12)$$

Onde $c_e = c + 2 t_f$;

e o fator de segurança F é igual a 1,45.

Os resultados foram comparados a ensaios experimentais (Bergfelt & Hovik, 1968), (Bergfelt, 1971), (Bergfelt, 1979), (Bergfelt, 1983), (Skaloud & Drdacky, 1975), (Drdacky & Novotny, 1977), (Roberts, 1981), (Roberts & Markovic, 1983), e os resultados podem ser vistos na Figura 2.4. Estes resultados experimentais, assim como os fornecidos por Kennedy et al. (1997), foram empregados neste trabalho para treinamento e avaliação das Redes Neurais e são apresentados no Anexo A. O trabalho desenvolvido por Kennedy et al. visava estudar o efeito de coexistência de flexão. Ficou confirmado que as imperfeições iniciais têm pouca importância na carga última da viga. Também foi adotado um parâmetro definido pelos autores como esbeltez normalizada, apresentado na equação abaixo:

$$B = (c + 9 t_f) t_w \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2.13)$$

Outro trabalho recente para determinar uma fórmula de projeto foi desenvolvido por Subbarao (1995). Usando elementos finitos lineares e não-lineares, ele chegou a um método de cálculo da carga de flambagem P_b , apresentado na equação 2.14.

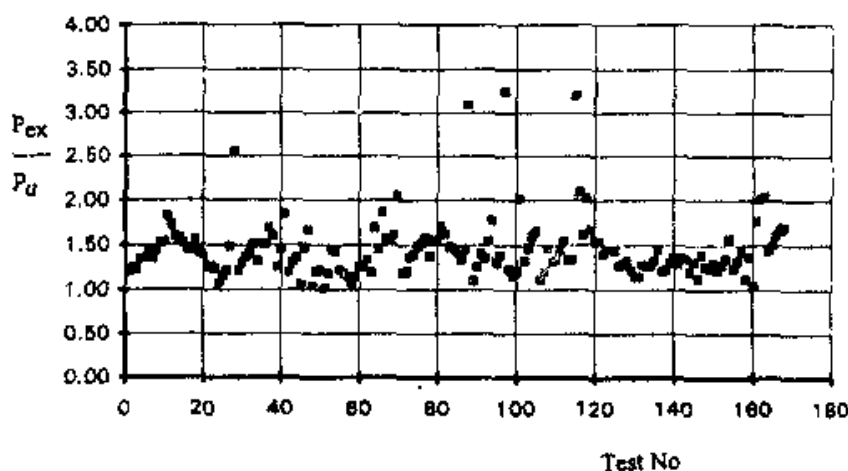


Figura 2.4 – Comparação da Equação 2.11 com Resultados Experimentais. (Roberts & Newark, 1997).

$$P_b = K_p \frac{\pi^2 D}{h} \quad (2.14)$$

onde para força aplicada em uma borda, no interior da viga:

$$D = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \text{ é a rigidez da placa;}$$

ν é o coeficiente de Poisson = 0,3;

$$K_p = \left[K_{p0}^2 + \left(K_{p1}^2 - K_{p0}^2 \right) \left(\frac{c}{a} \right)^2 \right]^{1/2};$$

$$K_{p0} = \frac{1}{1 + 0.8327(h/a)^{9.1882}} + \frac{6.66}{(a/h)^{1/2}} - \frac{8.74}{(a/h)} + \frac{4.66}{(a/h)^2}; \quad 3 \geq K_{p0} \geq 2.455$$

$$K_{p1} = \frac{1}{1 + (h/a)^{1.4921}} + \frac{(a/h + h/a)^2}{(a/h)}; \quad K_{p1} \geq 4$$

O método de projeto foi avaliado pelo autor como sendo mais consistente que os demais para a faixa de esbeltez de alma entre 25 e 250 avaliada em sua análise. No entanto este método foi desenvolvido para placas e por isso a influência das mesas não é considerada.

Um estudo interessante foi desenvolvido por Souza (1995), com o objetivo de demonstrar a capacidade de adequação do método de elementos finitos na modelagem do fenômeno de cargas concentradas. Foi utilizado um programa de elementos finitos não linear, Saloof, desenvolvido pelo professor Sebastião A.

Lopes de Andrade (1983). Os resultados foram comparados a soluções teóricas e ensaios experimentais. O modelo produziu resultados similares aos de Bergfelt (1979) e Roberts & Coric (1988). Foi constatado que as fórmulas existentes e o modelo de elementos finitos produziam erros médios da ordem de 20%.

Outro trabalho nesta área foi desenvolvido por Raoul et al. (1991). Várias vigas foram modeladas por elementos finitos, variando os diversos parâmetros do problema. Este estudo permitiu o desenvolvimento de uma nova equação que, no entanto, superestima a carga em 35%.

A norma canadense (CSA., 2001) sofreu alterações para considerar como resistência da alma para cargas concentradas o menor dos dois valores:

$$P_f = 0,8t_w(c + 10t_f)\sigma_y^w \quad (2.15)$$

$$P_f = 1,16t_w^2 \sqrt{\sigma_y^w E} \quad (2.16)$$

A norma européia (Eurocode 3, 1997) prevê que se faça uma única verificação que leva em conta os fenômenos de plastificação, flambagem e enrugamento na determinação da resistência última P:

$$P = \frac{P_y \chi}{1.1} \quad (2.17)$$

$$\text{onde: } P_y = \sigma_w t_w I_y; \quad I_y = c + 2t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right)$$

$$m_1 = \sigma_f b_f / \sigma_w t_w \quad m_2 = 0.02(h/t_f)^2$$

$$\chi = \frac{0.5}{\sqrt{\frac{P_y}{P_{cr}}}} \leq 1 \quad P_{cr} = k_F \left(\pi^2 E / 12 (1 - \nu^2) \right) \left(\frac{t_w^3}{h} \right)$$

$$\text{onde, para cargas concentradas interiores} \quad k_F = 6 + 2(h/a)$$

$$\text{senão:} \quad k_F = 2 + 6(c/h) \leq 6$$

2.3

Parâmetros Relevantes

De acordo com trabalhos mais recentes (Raoul et al., 1991), (Subbarao, 1995), (Roberts & Newark, 1997) a carga última é aproximadamente proporcional

ao quadrado da espessura da alma como já havia sido verificado por Bergfelt (1971), Figura 2.1. As dimensões da mesa, a altura da viga, as propriedades do material e o comprimento carregado têm importância secundária e sua influência está ligada a espessura da alma.

Um menor fator de forma a/h funciona como uma limitação da área de flambagem na alma e dá maior suporte à mesa carregada, aumentando ligeiramente a carga última. Os enrijecedores longitudinais podem ser vistos como uma redução da altura da viga e por isso mesmo, uma redução da esbeltez da alma.

Os gráficos apresentados a seguir apresentam a influência dos diversos parâmetros na resistência de vigas sujeitas a cargas concentradas:

Na Figura 2.5 é possível verificar que para uma mesma espessura de alma, a carga última varia quase linearmente em função da tensão limite de escoamento.

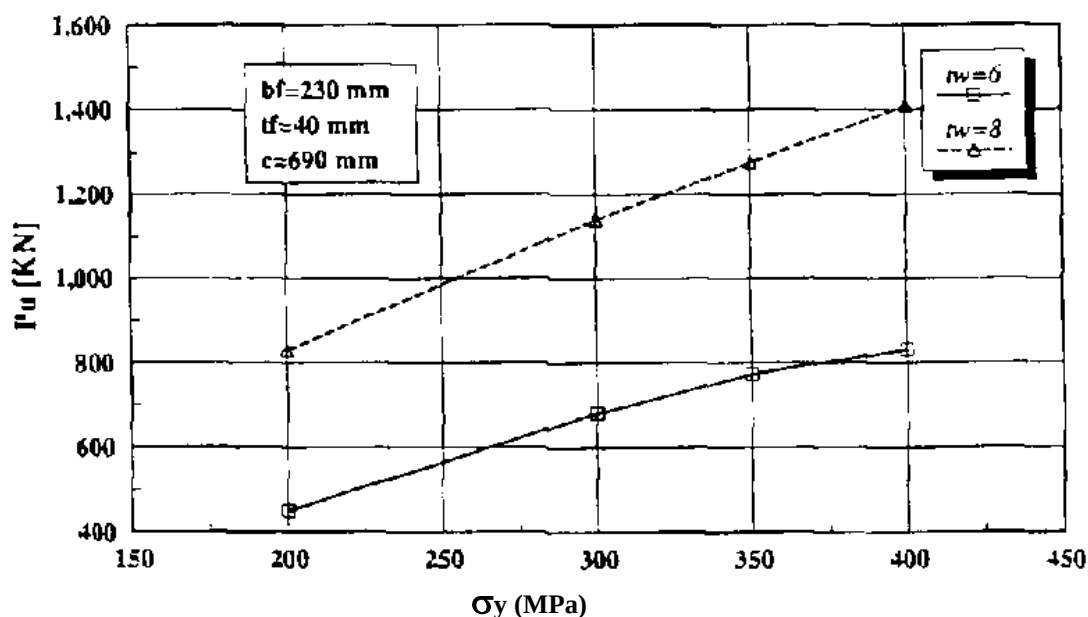


Figura 2.5 - Influência do Tipo de Aço na Carga de Ruína. (Raoul et al., 1991)

A Figura 2.6 mostra que a largura da mesa tem certa influência na carga última da viga, que apresenta uma variação mínima para diferentes valores de b_f .

É possível verificar na Figura 2.7 que a espessura da mesa, apesar de influir significativamente na carga última, está limitada pelo valor máximo permitido pela espessura da alma. Para almas mais espessas a influência da espessura da mesa é maior, podendo aumentar a carga última em até 80%.

O aumento do comprimento carregado c apresenta uma pequena melhora na carga última da viga, distribuindo a carga ao longo da alma e com isso reduzindo a concentração de tensões sob a mesa carregada, diminuindo as possibilidades de ocorrência de enrugamento. A Figura 2.8 apresenta esta variação para diferentes espessuras de alma.

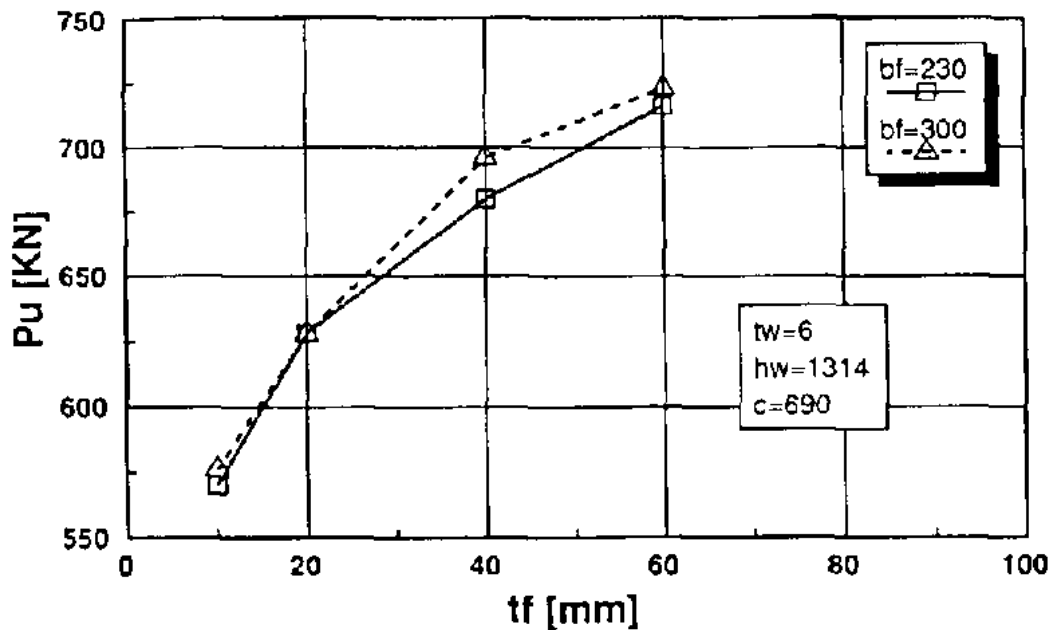


Figura 2.6 – Influência da Largura da Mesa na Carga de Ruína. (Raoul et al., 1991)

O aumento percentual da carga de ruína em função da variação do fator de forma a/h é mais significativo para espessuras de alma mais baixas. A contribuição deste parâmetro varia de 5% a 20% para as espessuras analisadas na Figura 2.9.

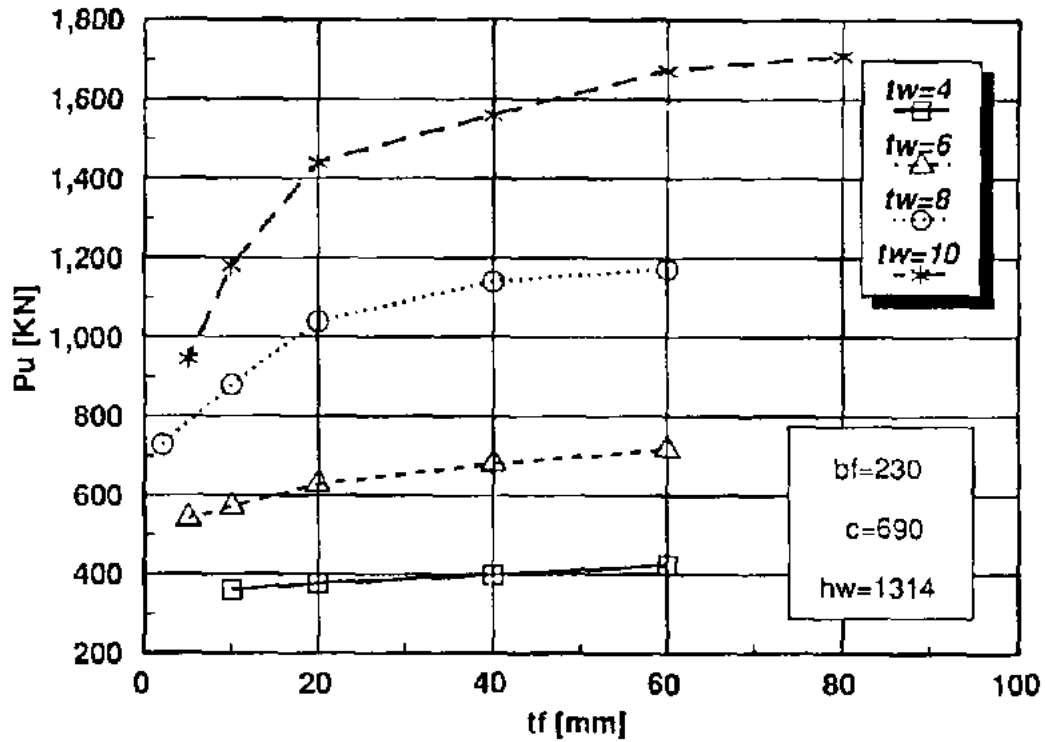


Figura 2.7 – Influência da Espessura da Mesa na Carga de Ruína. (Raoul et al., 1991)

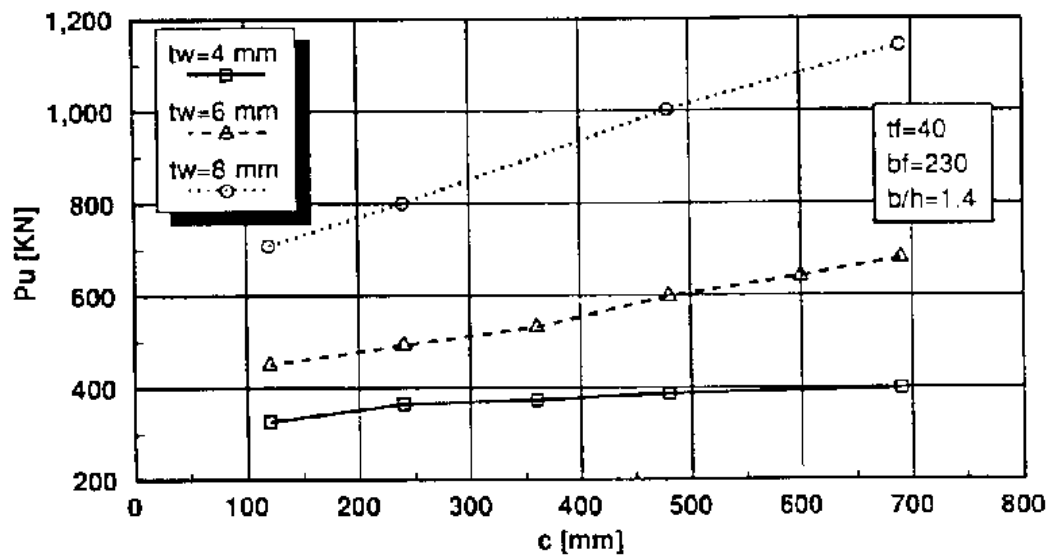


Figura 2.8 – Influência do Comprimento Uniformemente Carregado na Carga de Ruína. (Raoul et al., 1991)

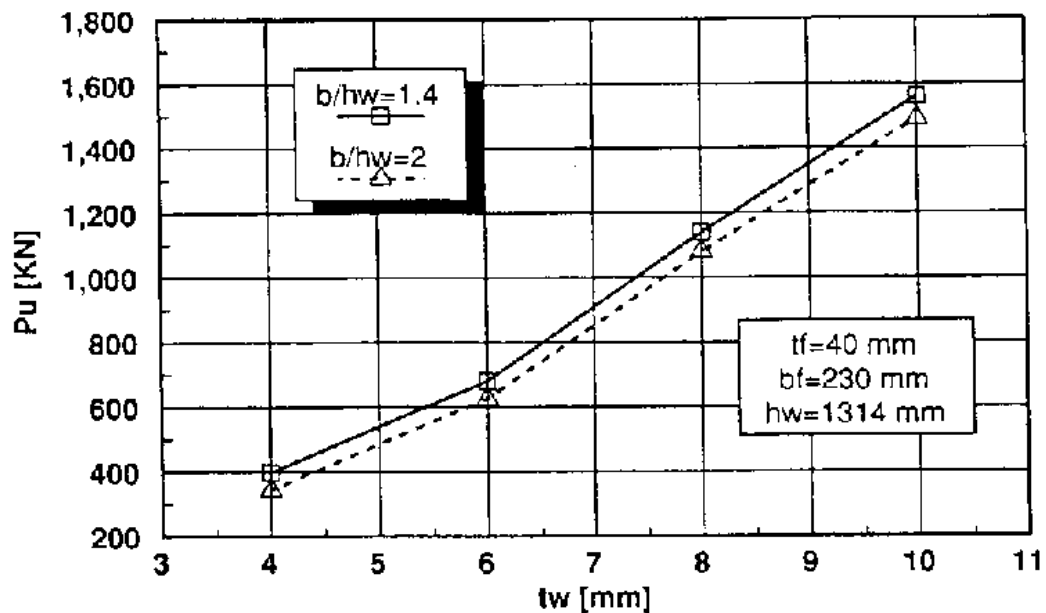


Figura 2.9 – Influência do Fator de Forma do Painel na Carga de Ruína. (Raoul et al., 1991)

Na dissertação de mestrado da autora (Fonseca, 1999) foram empregadas redes neurais para produzir novos dados que permitissem uma análise paramétrica do problema e algumas conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir:

- A formula proposta por Roberts & Newark (1997) apresenta um melhor desempenho quando comparada as fórmulas de Bergfelt e do Eurocode (Bergfelt, 1979) (Eurocode 3, 1997);
- Os erros percentuais das redes neurais foram bem inferiores aos das formulas existentes e das simulações por elementos finitos, qualificando assim estas redes para a geração de dados confiáveis para a análise paramétrica;
- A não consideração da influência do fator de forma e da largura da mesa nas fórmulas existentes foram as principais razões da diferença encontrada entre os resultados fornecidos por estas equações e os resultados das redes neurais. Desta forma; é possível concluir que parte do erro presente nas fórmulas existentes de previsão de carga crítica se deve a não consideração destes parâmetros no cálculo da carga última. Isto é particularmente relevante no aumento da carga crítica em vigas com o fator de forma a/h inferior a 2,5;

- A carga última é mais afetada pelo fator de forma a/h quando este é inferior a 2,5, confirmando os estudos de Karnikova et al. (1986) e Karnikova & Skaloud (1986). Para fatores de forma superiores a 2,5 a esbeltez da alma é mais importante;
- Os resultados das redes confirmaram as conclusões de Bergfelt & Hovik (1968), de que a altura da alma tem uma influência secundária na carga última, e que este parâmetro não deve ser avaliado isoladamente;
- O comprimento uniformemente carregado c influencia mais na carga última quando em vigas de mesas mais finas, ou seja, inferiores a 10 mm. Por outro lado, não se deve desvincular a espessura da mesa carregada da espessura da alma. Por exemplo: uma mesa de 10 mm em uma viga com 3 mm de alma influi de forma totalmente diversa em uma viga com alma de 8 mm. No primeiro caso, tende a ocorrer flambagem, enquanto no segundo, a distribuição de tensões da mesa para a alma pode ser insuficiente para gerar a plastificação completa da mesa;
- O fator de forma a/h influencia mais na carga última para comprimentos uniformemente carregados menores com razão c/h inferior a 0,2;

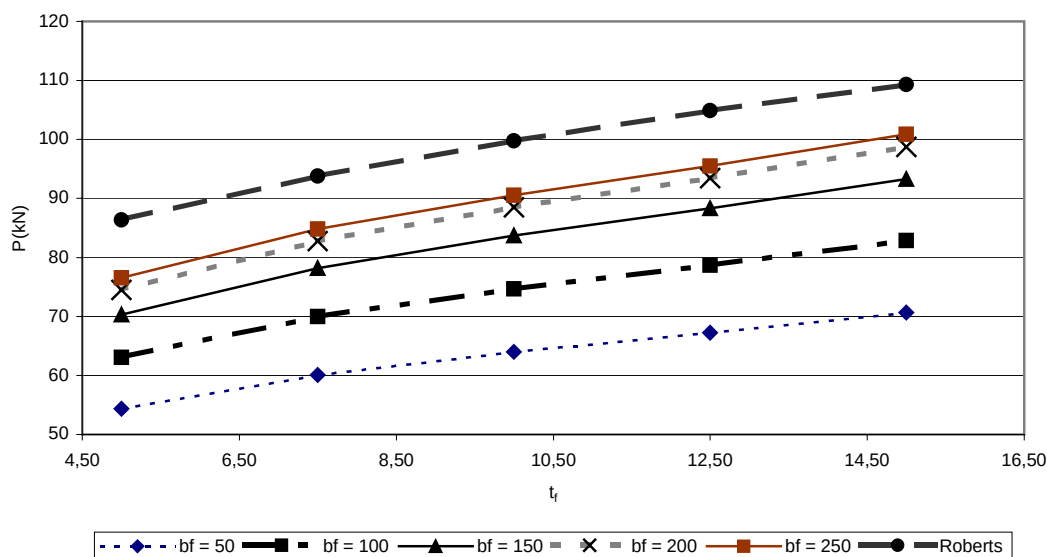


Figura 2.10 – Influência da mesa na carga última. (Fonseca, 1999).

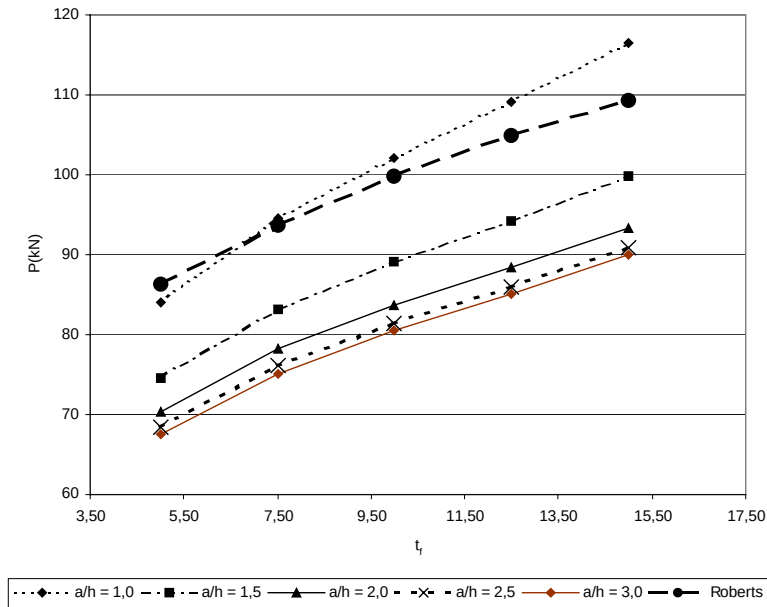


Figura 2.11 – Influência da espessura da mesa e do fator de forma na carga última (Fonseca, 1999).

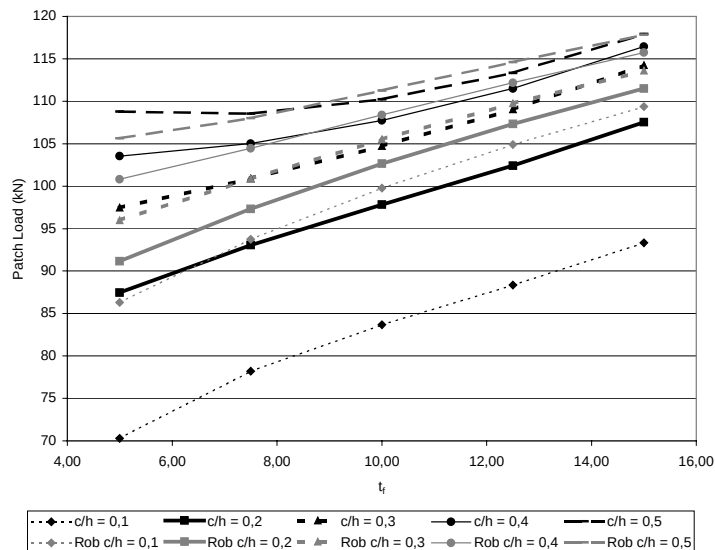


Figura 2.12 – Influência da Espessura da mesa e do comprimento carregado na carga última - (Fonseca, 1999).

- Para vigas de alma esbelta com h/t_w superiores a 80, a carga última aumenta significativamente em função da rigidez da mesa, que colabora para uma melhor distribuição da carga na alma e com isto minora os efeitos de plastificação na mesa;
- Para perfis de alma mais compacta, com esbeltez h/t_w inferior a 40, a influência da variação da razão c/h é mais significativa.

A tabela 2.1 apresenta um resumo dos trabalhos mais relevantes sobre cargas concentradas em vigas de aço.

Tabela 2.1– Resumo dos trabalhos desenvolvidos sobre o assunto.

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
35	Lyse & Godfrey	E	Ensaio de 6 vigas $h/t_w \cong 52$	Identificar os modos de colapso da alma	Concluíram ser um efeito localizado provocado por plastificação	$\sigma_{crit} = \frac{P}{t_w(c + 2t_f)} \leq \sigma_y \quad (2.1)$
49	Hendry	E	Análise Fotoelástica e Testes	Estudar a natureza do problema	Mostrou que o problema é restrito a uma área próxima à carga e mostrou os benefícios da extensão da placa de apoio. Verificou que zonas de escoamento na alma aparecem antes de zonas plastificadas na mesa e sugeriu que a teoria de cálculo da tensão cisalhante fosse válida apenas em uma distância maior que 1,5h do ponto de aplicação no método proposto.	—
55	Zetlin	T	Método de Energia	Solução simples baseada em gráficos para a flambagem de placas retangulares	Falhas atribuídas à resistência pós-flambagem e diferenças entre os testes e a teoria	—
60	Granholm	E	Ensaaios experimentais	Investigar os parâmetros que influenciam o problema	Demonstrou a influência principal da espessura da alma na capacidade de carga da viga	$P_f = 0.045Et_w^2 \quad (2.2)$
62	White & Cottingham	T	Programa de diferenças finitas	Cálculo da carga de flambagem elástica de placas retangulares	Estudo paramétrico mais preciso	—
67	Bossert & Ostapenko	E	Ensaaios experimentais	Investigar o efeito de uma carga uniformemente distribuída na resistência de vigas	-	-
68	Bergfelt & Hovik	E	Ensaaios experimentais	Examinar o problema em vigas não-enrijecidas e almas esbeltas	Verificou que a altura da viga, a dimensão das mesas e o vão têm uma influência secundária na carga de ruína e confirmou a influência principal da espessura da alma e concluiu que havia uma resistência pós-crítica.	-

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
68	Bagchi & Rockey	EF	Elementos finitos	Modelar o comportamento de almas sujeitas a cargas concentradas	Sugestão de uma fórmula não-dimensional para o cálculo da carga de flambagem	$\frac{P_b}{at_w} = K' \frac{\pi D}{h^2 t_w} \text{ onde } D = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)}$ (2.18)
70	Rockey	EF	Elementos finitos	Investigar a influência da interação mesa/alma	Descobriu que a mesa pode influenciar a carga de flambagem da viga e a distribuição de tensões na alma. Não houve calibração com resultados experimentais.	–
71	Bergfelt	E	Ensaaios experimentais em vigas com h/tw entre 150 e 350 e tw entre 2 e 6 mm	Definir 3 fases para o comportamento de vigas sujeitas a cargas concentradas: plastificação, flambagem e principalmente enrugamento.	Propôs uma fórmula para vigas de mesas finas onde o enrugamento governa.	$P_f = 0.045 E t_w^2 (0.55 + 0.22 t_f/t_w)$ (2.3)
71	Skaloud & Novak	E	Ensaaios com cargas estáticas e cíclicas	Estudar a influência da rigidez da mesa na capacidade de carga	Concluíram que as vigas têm uma resistência pós-flambagem alta e que a rigidez das mesas tem grande influência na carga última	-
71	Rockey & Elgaaly	EF	Elementos finitos	Desenvolver uma teoria a partir de investigações experimentais da influência de parâmetros combinados: c/a, a/h, h/tw	Desenvolveram uma fórmula para a carga última baseada na carga de flambagem elástica da alma	$P_f = P_b(4.5 + 6.4(c/a))(h/t_w)10^{-3}$ (2.19)
72	Skaloud & Novak	E	Nova série de testes variando a espessura e a largura das mesas	Estudar a influência da rigidez da mesa na capacidade de carga	Verificaram que em mesas mais finas, o colapso fica concentrado sob o ponto de aplicação da alma e que nas mais espessas o colapso ocorre de modo mais uniforme ao longo do painel de alma	-
72	Rockey et al.	E	Ensaaios experimentais	Estudar a influência de parâmetros combinados: c/a, a/h, h/tw	-	-

Ano	Autores e ref.	Tipo	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
72	Khan & Walker	T	Solução simplificada baseada no método de energia	Examinar a flambagem de placas retangulares e investigar a influência de imperfeições na carga de flambagem	Diferença menor que 5% entre o método de Energia e simulações de elementos finitos	-
73	Bazile	T	a) Teoria da Elasticidade b) Flambagem elástica usada em algumas normas c) Aproximação prática para o fenômeno	Comparação entre os três métodos	Nenhuma comparação foi feita com resultados experimentais.	-
74	Herzog	E	Ensaaios experimentais	Estudar a influência da carga concentrada em perfis de chapa dobrada	Verificou que a fórmula da Norma Alemã fornecia para o problema uma relação P_f/P_{exp} de até 7,37 e propôs uma fórmula alternativa	$P_f = 15t_w^2 (1 + c/a)^2 \times x(1 - L/100h) (1 - \sigma_b/\sigma_y) \sin\phi$ (2.20)
74	Herzog	E	Ensaaios experimentais	Estudar a influência da carga concentrada em vigas	Propôs uma nova fórmula empírica baseada em observações	$P_f = 20\sigma_y t_w^2 \sqrt{(t_f/t_w)(0.4 + h/a)}$ (2.21)
74	Herzog	E	Ensaaios experimentais	Aperfeiçoar a equação anterior	Propôs um novo modelo de dimensionamento	$P_f = 981t_w^2 [1.2 + 1.25 I_{fl}/I_w h/t_w (1 + c/h)^2 (0.85a/100h)] (1 - (\sigma_b/\sigma_y)^2)^{1/8}$ (2.22)
75	Skaloud & Drdacky	E	Ensaaios de vigas com h/t_w entre 200 e 400	Encontrar um procedimento de cálculo para a capacidade de carga	Verificou que o colapso ocorre geralmente a um terço da altura da viga, próximo a mesa carregada.	-
76	Bergfelt	E	Ensaaios experimentais	Prosseguir o trabalho de 71.	Descreveu o processo de ruína em três fases principais. A primeira até a alma começar a escoar. A segunda quando algumas pequenas dobras podem ser vistas na alma e a última fase daí até o colapso. Propôs alterações na equação (2.2) e estabeleceu fórmulas para a coexistência de momento fletor.	$P_f = 13 \eta t_l t_w \sigma_y \quad (2.4)$ $\frac{P}{P_f} = \sqrt{1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^2} \quad (2.5)$ $\frac{P}{P_f} = \sqrt[8]{1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^2} \quad (2.6)$

Ano	Autores e ref.	Tipo	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
77	Steup	T	Séries de Fourier	Minimizar a tensão de flambagem	Poucos exemplos e nenhuma calibração com resultados experimentais	-
77	Aribert & Lachal	E	Ensaaios experimentais de ligações viga-coluna	Estudar o problema como um caso de compressão de uma das mesas da viga na coluna	Desenvolveram um método baseado em um modelo elastoplástico e produziram 3 fórmulas que representam as cargas: elástica, plástica e de colapso	$P_e = 2.3 K t_w \sigma_y \quad (2.23)$ $P_{pl} = 5.0 K t_w \sigma_y \quad (2.24)$ $P_f = 7.0 K t_w \sigma_y \quad (2.25)$
77	Drdacky & Novotny	E	Ensaaios de vigas com h/tw entre 75 e 200	Encontrar um procedimento de cálculo para a capacidade de carga	Confirmaram a conclusão de Skaloud e Drdacky de que o colapso ocorre geralmente a um terço da altura da viga.	-
77	Khan et al.	T	Modificação do método de 72	Prever a carga de flambagem elástica das placas testadas antes	Estudo paramétrico mais preciso	-
78	Roberts & Rockey	E	Teorema dos trabalhos virtuais e mecanismos	Prever a resistência última das vigas	Criaram um método, baseado no mecanismo de rótulas plásticas, coerente com os resultados experimentais de Bergfelt & Hovik (1968) e Skaloud & Novak (1971) concluíram que a largura da mesa tem pouca influência na carga última.	$P_f = \frac{4M_{fl}}{\beta} + \frac{4\beta M_w}{\alpha \cos \theta} + \frac{2cM_w}{\alpha \cos \theta} - \frac{2\Omega M_w}{\alpha \cos \theta} \quad (2.8)$
79	Bergfelt	E	Ensaaios experimentais	Estudar a influência dos enrijecedores e os parâmetros que governam o problema	Propôs uma fórmula composta pelos diversos parâmetros que influenciam o problema	$P_f = 0.8 t_w^2 \sqrt{E \sigma_y^w \left(\frac{t_i}{t_w} \right)} f^* \quad (2.7)$
79	Roberts & Rockey	E	Comparação entre os métodos de cálculo e os resultados experimentais	Encontrar o método de cálculo mais preciso comparando Granholm, Bergfelt, Dubas & Gehri, Skaloud & Novak e Herzog	O método dos autores foi considerado melhor, apresentando menor coeficiente de variação	-
79	Rockey et al.	EF	Elementos finitos	Verificar a influência de enrijecedores longitudinais	Descobriram uma relação entre a carga de flambagem e a resistência à flexão do enrijecedor embora só seja aplicável quando o enrijecedor está a um quinto da altura da alma, próximo a mesa carregada, sendo k'=11,4 e bs/ts = 17	-

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
80	Thornton & Conway	T	a) Análise de tipo Levy b) Método de superposição	Investigar o comportamento de uma placa retangular isotrópica e homogênea com dois bordos livres e dois simplesmente apoiados sujeita a carga concentrada em um dos bordos livres	Os resultados foram coerentes com ensaios executados em placas quadradas	-
81	Roberts	E	Nova série de testes	Estudar a influência das dimensões da mesa e da altura da alma na capacidade de carga última.	Confirmou que a carga é proporcional ao quadrado da espessura da alma e a largura da mesa. Verificou que a influência da altura da alma é pequena. Criou um método de escolha entre os dois menores valores das fórmulas 1 e 2.	$P_f = 0.5 t_w^2 \sqrt{E \sigma_y^w t_f / t_w}$ $[1 + (3 + c/h)(t_w/t_f)^{3/2}]$ (2.9) $P_f = 4 \sqrt{M_{fl} \sigma_y^w t_w + \sigma_y^w t_w^c}$ (2.11)
81	Aribert et al.	E	Método de rótulas plásticas	Refinar o modelo de 77 e estudar a influencia de um enrijecedor transversal colocado a uma distância e do ponto de aplicação da carga	Desenvolveram 3 equações	$P_e = 2,3 K t_w \sigma_y^w +$ $+ 0.5 (1 - 0,5 e/K) A_{st} \sigma_y^{st}$ (2.26) $P_{pl} = 5.0 K t_w \sigma_y^w +$ $+ 0.5 (1 - 0.5 e/K) A_{st} \sigma_y^{st}$ (2.27) $P_f = 7.0 K t_w \sigma_y^w +$ $+ 0.5 (1 - 0.5 e/K) A_{st} \sigma_y^{st}$ (2.28)
81	Roberts & Chong	E	Teorema dos trabalhos virtuais e mecanismos	Investigar o efeito de uma carga uniformemente distribuída na resistência de vigas	Desenvolveram um novo tipo de mecanismo e duas novas equações, sendo a segunda para casos plastificação excessiva. As fórmulas não apresentaram bons resultados quando comparadas a resultados experimentais	$P_f = (8 M_{fl}/\beta) + (4 \beta M_w/\alpha \cos \theta) +$ $- (1 - 4 M_w/\alpha \cos \theta \sigma_y^w t_w)^2)^{1/8}$ (2.29) $P_f = 8 M_{fl} / \beta + 2 \beta \sigma_y^w t_w$ (2.30)

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
82	Smith & Gierlinski	T	Método de faixas finitas	Estudar a influência de enrijecedores longitudinais, considerando a influência da resistência a flexão e torção.	Verificaram a importância da rigidez a flexão do enrijecedor e da relação entre a resistência a flambagem da alma e a resistência à torção do enrijecedor.	-
83	Mukhopadhyay	EF	Elementos finitos isoparamétricos quadráticos	Simular o problema com diferentes fatores de forma	Desenvolveu um valor explícito para a Matriz de carga e examinou placas com diferentes fatores de forma. Não houve comparação com resultados experimentais ou sugestão de carga de flambagem	—
83	Bergfelt	E	Ensaaios experimentais	Estudou os efeitos dos enrijecedores horizontais na capacidade de carga da viga	Confirmou que a altura da viga, h, tem pouca influência na carga última para vigas com esbeltez de alma h/t_w maior que 150. Concluiu que para as vigas analisadas com uma razão b_f/t_f maior que 12, a largura da mesa b_f tem um papel secundário na carga última e que a maior vantagem da utilização de enrijecedores horizontais era a modificação da configuração de flambagem da alma.	-
83	Roberts & Markovic	E	Nova série de testes	Encontrar o método de cálculo mais preciso comparando com Granholm, Bergfelt, Dubas & Gehri e Skaloud & Novak.	Concluiu que seu método era muito conservativo para vigas leves e sugeriu que apenas a equação 2.9 fosse utilizada.	-
83	Moriwaki et al.	E	Nova série de testes em perfis I e vigas caixão	Observar o mecanismo de colapso	Criou uma fórmula envolvendo a resistência a flambagem elástica da alma, a resistência pós-flambagem da alma e a resistência da mesa.	$P_f = P_b + P_w + P_{fl}$ (2.31)
86	Drdacky	E	Nova série de testes	Observar o mecanismo de colapso	Descobriu uma transição suave entre os estágios de antes e depois da flambagem e sugeriu outra expressão	$P_f = 19.54 t_w^2 \sigma_w^2 (1 + 0.004 c/t_w) (I_{fl}/t_w^4)^{0.5}$ (2.32)

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
86	Dubas	E	Ensaio experimentais	Investigar a interação carga/momento	Mostrou que as 2 equações propostas por Bergfelt dão resultados muito diferentes e observou que a utilização de enrijecedores longitudinais na alma fornece ótimos resultados quando colocados a uma distância menor que $80 t_w$ da mesa carregada	-
86	Coric	E	Nova série de testes para vigas de vãos grandes e mesas estreitas	Observar o mecanismo de colapso	Criou uma nova fórmula, embora esta seja muito complicada para o uso na prática diária.	$P_f = 4 M_{fl} / \beta + 2 M_w \beta \tan \theta / (1 + 1/z) + M_w c (\tan \theta (2 + 1/z) / (\alpha (1 + 1/z))) + 2 M_w \gamma \tan \theta / \alpha$ $\beta = \left[\frac{2 M_{fl} \alpha (1 + 1/z)}{M_w \tan \theta} \right]; \quad \alpha = \frac{c}{1.25 t_w}$ $\gamma = \frac{t' \sigma'}{10 t_w \sigma_y}; \quad z = \gamma / h (0.6 h / \gamma - 6.5 \gamma / h)$ $t' = 2.0 mm^2; \sigma' = 300 N / mm^2 \quad (2.33)$
86	Karnikova et al. Karnikova & Skaloud	E	Ensaio experimentais	Observar a influência de enrijecedores longitudinais	Concluíram que nas vigas com fator de forma < 0,25 a carga era mais afetada	-
86	Herzog	E	Ensaio experimentais	Aperfeiçoar a equação de seu trabalho anterior (74)	Nova fórmula de projeto	$P_f = 1000 t_w^2 [1.2 + 1.25 I_{fl} / I_w h / t_w (1 + c/h)^2 (0.85 a / 100 h)] (1 - (\sigma_b / \sigma_y)^2)^{1/8} \quad (2.34)$
87	Weimar & Ramm	EF	Elementos de casca não-lineares	Fazer uma análise paramétrica do problema	Concluiu que o método pode produzir bons resultados para previsão da carga última e que a espessura da alma era realmente o parâmetro mais importante	-

Ano	Autores e ref.	Tipo	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
87	Galea et al.	E	Série de ensaios combinando posições diferentes de enrijecedores com a presença de momento	Investigar os benefícios do uso de enrijecedores longitudinais na capacidade de carga última	Concluíram que a presença de enrijecedores aumentava a capacidade de carga em mais de 37% e que a posição do enrijecedor tem pouca influência na carga última. Mostraram que mesmo pequenos momentos têm uma grande influência na carga de ruína.	-
88	Roberts & Coric	E	Modelo de charneiras plásticas	Verificar a equação 1 de Roberts 83 e investigar a interação carga/momento	Trocaram o coeficiente 0,5 por 0,77 na fórmula (2.9).	$P_f = 0.77 t_w^2 \sqrt{E \sigma_y \frac{t_f}{t_w}} \left[1 + \left(\frac{3c}{h} \right) \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^{3/2} \right]$ (2.35)
88	Aribert et al.	E	Ensaaios experimentais	Investigar outros aspectos do mesmo assunto de 77 e 81, como por exemplo: um contato oblíquo entre a viga e a coluna.	Nova fórmula para a carga de plastificação da coluna	$P_{pl} = L_p t_w \sigma_y / \sin \theta_b$ (2.36)
89	Elgaaly & Nunan	E	Ensaaios experimentais e modelo de elementos finitos lineares	Estudar a influência de pequenas excentricidades da carga em relação ao plano da alma	Verificaram que a excentricidade provocava uma queda de mais de 50% na capacidade de carga da viga.	-
89	Shimizu et al.	E	Modelo de linhas plásticas	Sugerir um mecanismo composto por duas linhas de plastificação na alma e quatro rótulas plásticas na mesa carregada	Sugeriram um novo modelo similar ao de Roberts & Rockey (1978) para o cálculo da carga de ruína mas alguns testes ainda teriam que ser feitos	-
90	Shimizu et al.	T	Método de relaxação finita	Fazer uma análise paramétrica do problema	Descobriu que para vigas com comprimento uniformemente carregado menor e mesas flexíveis, um modelo de 3 linhas plásticas pode ser usado.	-

Ano	Autores e ref.	Tipo	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
90	Aribert et al.	E	Ensaaios experimentais	Outra abordagem, para tratar os casos de cargas aplicadas dos dois lados da coluna.	Nova fórmula para a carga de colapso	$P_f = P_{cy} (1/\lambda(1 - 0,22/\lambda)) \leq P_{cy}$ (2.37) $\lambda = \sqrt{\frac{P_{crit}}{P_{cy}}}; P_{crit} = \frac{\pi E t_w^3}{3h(1 - \nu^2)}$ $P_{cy} = \sigma_y^w t_w (c + 2t_e + 2K);$
90	Dubas & Tschampeer	E	Séries de testes com carga isolada, momento isolado e combinação de carga e momento.	Investigar a interação carga/momento	Propuseram duas fórmulas, uma para o cálculo da carga última, composta pelas parcelas de resistência da alma e da mesa, e outra para levar em conta a interação carga momento.	$P_f = 0,11 t_w^2 (E \sigma_y^w (c + 2t_f)/t_w)^{1/2}$ $+ (b_f t_f / 100 t_w^2)^{1/2}$ $(E \sigma_y^{fl} t_w^5 (c + 2t_f))^{1/3}$ (2.38)
91	Dogaki et al.	T	Procedimento de diferenças finitas	Modelar o comportamento das vigas sujeitas a cargas concentradas e comparar com experiências	Investigaram a influência do comprimento da carga, a razão altura/espessura da alma, tensões residuais e imperfeições iniciais.	-
91	Raoul et al.	EF	Elementos Finitos	Fazer uma análise paramétrica do problema	Desenvolveu um programa de elementos finitos não-lineares triangulares e comparou com 118 resultados experimentais de Gales et al. (87). Desenvolveu uma equação que superestima a carga última em 35%	$P_f = 1,38 (E)^{0,3} (\sigma_y^w)^{0,7}$ $(t_w)^{1,53} (I_{fl})^{0,06} (c)^{0,23}$ $\text{com } I_{fl} = b_f t_f^3 / 12$ (2.39)
92	Markovic & Hajdin	E	Análise de Resultados Experimentais	Estudar o comportamento de vigas com enrijecedores longitudinais	Apresentaram uma discussão sobre a aplicabilidade das várias fórmulas desenvolvidas por diferentes autores.	-
92	Kutmanova & Skaloud	E	Ensaaios Experimentais	Descrever as conclusões dos vários anos de investigações experimentais e avaliar a influência de enrijecedores longitudinais para cargas constantes e recorrentes de curta duração	Estabeleceram fórmulas para a rigidez ótima do enrijecedor longitudinal e para a carga última de vigas sujeitas a cargas concentradas, enrijecidas longitudinalmente. Estabeleceram uma carga para o limite de fadiga.	-

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
93	Velasco et al.	RB	Revisão bibliográfica	Apresentar uma revisão dos estudos mais relevantes sobre o assunto	Concluiu que apesar dos vários esforços teóricos, numéricos e experimentais, não existe ainda uma solução fechada, única para o problema.	-
95	Subbarao	EF	Elementos Finitos lineares e não-lineares	Determinar uma fórmula de projeto	Descobriu que para determinada relação c/h a razão P_u/P_{cr} varia linearmente. Desenvolveu um método que pode ser usado para quaisquer c, h/a, h/tw.	$P_b = K_p \frac{\pi^2 D}{h} \quad (2.14)$
95	Souza	EF	Modelagem por elementos finitos utilizando o programa Saloof.	Demonstrar a adequação dos elementos finitos à modelagem do problema.	Os resultados encontrados se mostraram similares aos fornecidos pelas fórmulas 2.6 e 2.9. Foi constatado que o erro percentual fornecido pelas fórmulas e por elementos finitos era da ordem de 20%.	-
95	Johansson & Lagerqvist	E	Ensaaios experimentais	Estudo do comportamento de almas esbeltas	Forneceram um método de projeto similar aos usados em outros problemas de flambagem	-
95	Lagerqvist	E	Ensaaios experimentais	Estudo do comportamento de almas esbeltas	Modificaram o método do trabalho anterior e forneceram uma revisão bibliográfica extensa do problema	-
96	Lagerqvist & Johansson	E	Ensaaios Experimentais	Abordar os três casos de Carregamento: cargas opostas, carga central e de extremidade.	Foram sugeridos novos métodos de projeto consistentes nos três casos de carregamento e compatíveis com os usados em outros problemas de flambagem, mas não incluem a influência de enrijecedores longitudinais na alma. Estes métodos foram apresentados para o uso no Eurocode.	-
96	Prabha	E	Ensaaios experimentais	Avaliar o comportamento do problema	Propôs uma solução simplificada baseada no conceito equivalente de colunas, mas foi confirmado que era um problema de flambagem de placas.	-

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
96	Souza et al.	EF	Elementos Finitos	Demonstrar as vantagens de uma simulação computacional na modelagem do problema	O modelo de Elementos finitos adotado provou ser eficiente para o estudo do problema. Mostrou que as imperfeições iniciais são desprezíveis na alteração da carga de ruína para o tipo de viga simulado	-
97	Roberts & Newark	E	Ensaaios experimentais	Avaliar o comportamento do problema	As soluções por mecanismos são reduzidas a equações simples para uso prático	$P_f = \left[\frac{1.1 t_w^2 (E \sigma_y)^{0.5} x}{\left(\frac{t_f}{t_w} \right)^{0.25} \left(1 + \frac{c_e t_w}{h t_f} \right)} \right] \frac{1}{F}$ (2.12)
97	Kennedy, et al.	E	Ensaaios experimentais	Estudar o problema e avaliar o efeito de flexão coexistente	Desenvolveu um modelo de resistência pós-flambagem e concluiu que as imperfeições iniciais têm pouca importância	-
97a 97b	Granath	EF	Elementos Finitos	Avaliar o Comportamento das vigas sujeitas a cargas concentradas a partir dos resultados de Roberts 81	Concluiu que para as vigas estudadas, com espessuras de alma pequenas, as dimensões da mesa não influem tanto quanto a sua rigidez a flexão.	-
98	Souza et al.	EF	Elementos Finitos	Investigar a influência dos parâmetros envolvidos no problema	Verificou que as fórmulas existentes ainda fornecem um erro superior a 20%. Confirmou a importância da espessura da alma e a relação de proporcionalidade com a raiz quadrada da tensão de escoamento.	-
99	Granath & Lagerqvist	EF	Elementos Finitos e ensaios experimentais	Avaliar a deformação e o comportamento das vigas sujeitas a cargas concentradas .	Apresentou diferentes tipos de deformação relacionados às características geométricas das vigas e explicou a flambagem pós-crítica em vigas esbeltas.	-
99	Shahabian & Roberts	EF	Elementos Finitos	Procedimento aproximado para determinar a carga última de almas sujeitas a combinações de carga.	Os resultados para flambagem por compressão, flexão e cisalhamento foram compatíveis com formulações teóricas.	-

Ano	Autores e ref.	Tipo*	Método	Objetivos	Resultados e Conclusões	Fórmulas
99	Tryland et al.	EF	Elementos Finitos e resultados experimentais	Validar os métodos numéricos na avaliação do problema de cargas concentradas.	A correlação dos resultados numéricos e experimentais foi de 1%. Para vigas esbeltas, a resposta é mais acurada, embora seja difícil prever os resultados para vigas compactas.	-
00	Granath	EF	Elementos Finitos	Propor um método para a previsão do estado limite de serviço para vigas sujeitas a cargas concentradas	Foi proposto um método onde nenhuma plastificação é permitida na alma e avaliadas novas formulas.	-
00	Granath et al.	EF	Elementos Finitos	Avaliar o comportamento de vigas sujeitas a cargas concentradas e momento fletor constante.	As simulações mostraram que deformações irreversíveis reduzem a capacidade de carga das vigas e que um estado limite de serviço deve ser estabelecido.	-
01	Roberts & Shahabian	T E	Teoria e ensaios experimentais	Estudar a resistência de vigas sujeitas a combinações de cargas concentradas, momento e cisalhamento.	Propôs uma fórmula para combinação de diferentes esforços que apresentou bons resultados comparados aos valores de testes.	-
01	Johansson et al.	RB	Revisão bibliográfica	Revisão do Eurocode 3 com relação ao problema e comparação com resultados experimentais.	Concluiu que esta versão do Eurocode pode ser melhorada em vários aspectos.	-
03	Graciano	T E	Teoria e testes experimentais	Descrever uma metodologia para determinar a carga última de vigas de aço enrijecidas longitudinalmente, sujeitas a cargas concentradas.	Demonstrou a influência da posição relativa do enrijecedor, do tamanho da mesa carregada e da relação entre as tensões limite de escoamento da alma e da mesa na carga última.	-
* - E – Experimental; EF – Elementos Finitos; T – Teórico; RB – Revisão Bibliográfica.						