

## **ESTUDO COMPARATIVO DA FLAMBAGEM DE UMA VIGA W: ANÁLISE EXPERIMENTAL E CÁLCULO ANALÍTICO SEGUNDO A NBR 8800:2008**

Bárbara E. Ferreira<sup>1\*</sup>, Marina X. S. Assis<sup>1</sup>, Péricles B. Andrade<sup>2</sup>,

1. Estudante de Engenharia Civil da PUC Minas

2. Mestre/Professor PUC Minas - Departamento de Engenharia Civil / Orientador

### **Resumo:**

De acordo com Borges (2015), no Brasil, apesar da escassez de mão de obra qualificada, a utilização de estruturas metálicas nas edificações vem aumentando consideravelmente devido a inúmeros benefícios proporcionados pelas estruturas metálicas. A maioria dos projetos e elementos de aço podem ser dimensionados analiticamente, conforme descrito na NBR 8800:2008. Contudo, muitas decisões requeridas durante a elaboração do projeto e cálculo são tomadas, inevitavelmente, sob condições de incertezas. Este artigo apresenta um estudo comparativo da carga crítica de flambagem de uma viga W, segundo análise experimental e cálculo analítico conforme NBR 8800:2008. A viga foi submetida ao ensaio de flexão simples, no qual foi medido o deslocamento vertical. A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que ensaios são de grande valia na análise comportamental das estruturas de aço pois, além da possibilidade de se comparar os resultados obtidos experimentalmente com os cálculos analíticos, é possível estudar e avaliar a resposta de uma peça estrutural de aço para um determinado esforço, chegando a um resultado mais próximo da realidade.

**Palavras-chave:** Flexão simples; Flambagem; NBR 8800:2008.

**Apoio financeiro:** Os autores agradecem a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUCMG e a Secretaria de Educação Superior MEC/SESu pelo apoio recebido no desenvolvimento deste trabalho.

### **Introdução:**

A utilização das estruturas de aço nas construções vem sendo, há décadas, uma tendência mundial e, embora atrasado, o Brasil despertou para o grande mercado da construção industrializada, aumentando o uso das estruturas metálicas (GRUPO CIMM, 2006).

Esse aumento se deve aos inúmeros benefícios proporcionados pelas estruturas de aço. Dentre as vantagens, pode-se citar o alívio provocado nas fundações, devido a maior resistência do aço, acarretando em um projeto mais leve e, por consequência, diminuindo os custos da fundação. Os canteiros de obras se tornam mais organizados, pois o escoramento é dispensado, as lajes são realizadas imediatamente e há redução no manuseio de materiais em obra, diminuindo também a área necessária ao canteiro. A racionalização dos materiais e mão-de-obra provocam uma redução do tempo de construção, já que o processo de montagem se torna mais rápido. Por fim, o maior grau de industrialização da estrutura metálica, além de proporcionar um ótimo resultado no alinhamento da construção, oferece também a garantia dos materiais, por serem previamente testados, oferecendo um alto grau de segurança em sua utilização (NARDIN, 2008).

Para isso, os elementos estruturais de aço utilizados nas construções devem ser corretamente dimensionados a fim de se evitar danos à estrutura quando solicitada pelo carregamento. A maioria dos projetos e elementos de aço podem ser dimensionados analiticamente, conforme descrito na NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Contudo, muitas decisões requeridas durante a elaboração do projeto e cálculo são tomadas, inevitavelmente, sob condições de incertezas. Logo, há sempre uma probabilidade de falha ou mau desempenho da estrutura, ou seja, o risco é inevitável (SANTOS, 2000).

Portanto, nota-se que os ensaios são de grande valia na análise comportamental das estruturas de aço, pois é possível comparar os resultados experimentais obtidos com os

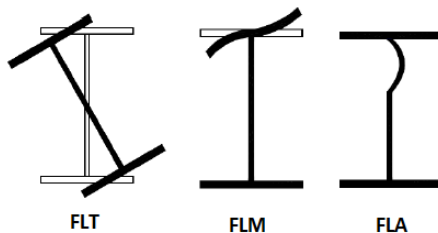
calculados analiticamente, proporcionando maior segurança ao dimensionamento. Além disso, é possível estudar e avaliar a atuação de uma peça estrutural de aço sob determinado esforço, alcançando um resultado mais próximo da realidade.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo da carga crítica de flambagem de uma viga de aço bi apoiada, constituída de perfil laminado de seção I do tipo W150x13, através de análise experimental e cálculo analítico segundo a NBR 8800:2008.

### Metodologia:

Neste trabalho uma viga não esbelta submetida à flexão em torno do eixo de maior inércia foi verificada quanto aos estados limites últimos (ELU) de flambagem local da alma (FLA), de flambagem local da mesa (FLM) e de flambagem lateral com torção (FLT), ver Figura 1. Realizou-se também uma verificação quanto ao deslocamento vertical máximo permitido pela NBR 8800:2008.

Figura 1 – FLT, FLM e FLA



Fonte: Adaptado de Borges, 2015.

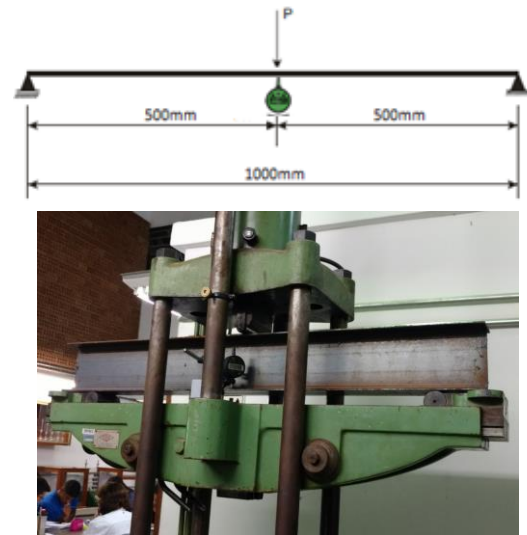
Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada uma viga de aço, constituída de perfil Gerdau Aço Minas laminado de seção I do tipo W150x13, ASTM A572 grau 50 de abas paralelas com dois eixos de simetria.

O ensaio de flexão simples foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

A viga foi bi-apoiada em dois cutelos com distância entre os mesmos de 1000 mm e foi sujeita à aplicação de uma força concentrada no meio do vão através de um outro cutelo posicionado na parte superior da viga, conforme Figura 1.

Com o objetivo de medir o deslocamento vertical, foi utilizado um relógio comparador com precisão de 0,01 mm e leitura máxima de 50 mm, posicionado no meio do vão da viga, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Esquema do ensaio



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a aplicação da carga, utilizou-se um atuador hidráulico da marca AMSLER, com capacidade de carga de 40 toneladas, com uma velocidade de deslocamento, ou descida de pistão, constante. A leitura do carregamento foi feita através da célula de carga do atuador.

A aquisição dos dados do relógio comparador e da célula de carga foi feita em intervalos de 1 kN.

Juntamente com a análise experimental da viga foi realizado um estudo teórico através de cálculos analíticos seguindo as recomendações da NBR 8800:2008, visando posterior comparação de resultados.

De acordo com o anexo D da NBR 8800:2008, o momento resistente característico ( $M_{Rk}$ ) é determinado em função do tipo de instabilidade que causará a falha do elemento, a saber, FLA, FLM e FLT.

Para flambagem plástica ( $\lambda \leq \lambda_p$ ), tem-se:

$$M_{Rk} = M_{pl} = Z_x f_y \quad (\text{FLA, FLM e FLT}) \quad (1)$$

Para flambagem inelástica ( $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ ), tem-se:

$$M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \leq M_{pl} \quad (\text{FLA e FLM}) \quad (2)$$

$$M_{Rk} = C_b \left[ M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \leq M_{pl} \quad (\text{FLT}) \quad (3)$$

Para flambagem elástica ( $\lambda > \lambda_r$ ), tem-se:

$$M_{Rk} = M_{cr} \quad (\text{FLA, FLM e FLT}) \quad (4)$$

Onde  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  são os parâmetros de esbelteza definidos pela NBR 8800:2008, como função do estado limite,  $M_{pl}$  é o momento de plastificação e  $M_r$  e  $M_{cr}$  são momentos definidos pela NBR 8800:2008 como função do estado limite.

O momento resistente será, portanto, o menor dos três valores calculados para FLA, FLM e FLT, através das equações 1, 2, 3 e 4, porém limitado a equação 5.

$$M_{Rk} \leq 1,5 W_x f_y \quad (5)$$

Para encontrar o valor da carga a partir da qual a viga falharia quanto aos estados limites últimos, supôs-se que o momento resistente característico ( $M_{Rk}$ ) seria igual ao momento solicitante característico ( $M_{Sk}$ ), que pode ser calculado através da equação 6.

$$M_{Sk} = \frac{PL}{4} \quad (6)$$

Assim, foi possível calcular a carga crítica teórica de flambagem pela equação 7.

$$P_{cr} = \frac{4 M_{Rk}}{L} \quad (7)$$

De acordo com Borges (2015), define-se como carga crítica a força a partir da qual ocorrerá a ruína total ou parcial da viga.

O anexo C da NBR 8800:2008 apresenta uma tabela com os valores máximos para os deslocamentos verticais. Considerou-se a viga ensaiada como sendo uma viga de piso. Assim foi possível calcular o deslocamento vertical máximo permitido da mesma através da equação 8.

$$\delta = \frac{L}{350} \quad (8)$$

### Resultados e Discussão:

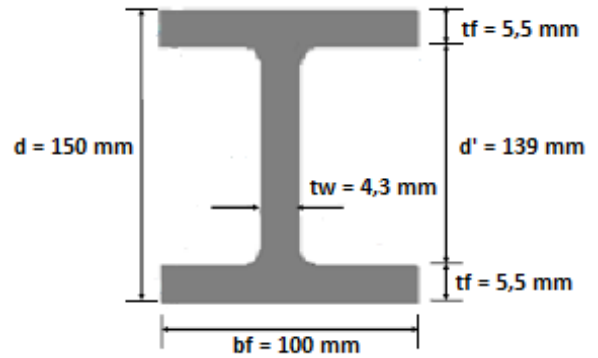
As propriedades geométricas da viga utilizada nesta pesquisa são especificadas na Tabela 1 e na Figura 3.

**Tabela 1 – Propriedades geométricas da seção transversal da viga estudada**

	Eixo x	Eixo y
Área (cm <sup>2</sup> )	17,3	
J (cm <sup>4</sup> )	1,70	
C <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	479	
I (cm <sup>4</sup> )	687	91,8
W (cm <sup>3</sup> )	91,6	18,4
r (cm)	6,3	2,30
Z (cm <sup>3</sup> )	103	28,3

Fonte: Adaptado de Gerdau Aço Minas.

**Figura 3 – Seção do perfil ensaiado**



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir das equações apresentadas no item anterior e das recomendações da NBR 8800:2008, calculou-se o valor de  $M_{Rk}$  para FLA, FLM e FLT. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Resultados do Momento resistente característico para FLA, FLM e FLT**

	FLA	FLM	FLT
$M_{Rk}$	26,1 kNm	26,1 kNm	36,1 kNm
$M_{Rk} \leq 1,5 W_x f_y$	32 kNm		

Fonte: Elaborado pelos autores.

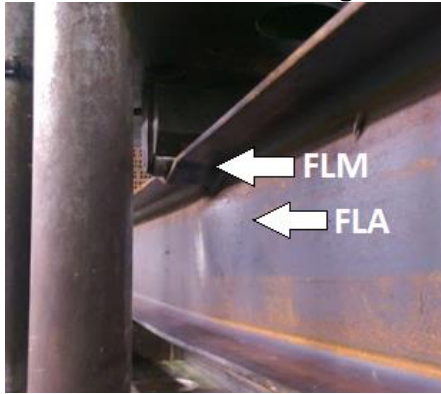
Conforme a NBR 8800:2008, deve-se adotar o menor valor de  $M_{Rk}$  entre os três calculados, limitado a condição expressa na equação 5. Assim, teve-se como resultado um momento resistente característico de 26,1 kNm.

Supondo  $M_{Rk}$  igual a  $M_{Sk}$ , foi possível calcular a carga crítica teórica de flambagem através da equação 7, chegando-se a um valor de 104 kN.

Verificou-se, segundo a NBR 8800:2008, que o deslocamento vertical máximo permitido para uma viga de piso bi apoiada com 1000 mm de vão deveria ser de 2,86 mm.

A viga ensaiada apresentou um deslocamento vertical de 2,05 mm, inferior ao deslocamento máximo permitido pela norma, e falha devido a flambagem local da alma e da mesa (FLA e FLM) para uma carga de 122 kN, ou seja, inferior a carga crítica teórica. A Figura 4 apresenta o modo de falha da viga.

Figura 4 – Modo de falha da viga ensaiada



Fonte: Elaborado pelos autores.

### Conclusões:

Diante dos resultados apresentados, nota-se que o deslocamento vertical máximo atendeu ao limite estabelecido pela NBR 8800:2008, já que experimentalmente ocorreu um deslocamento 28,32% menor do que o valor calculado.

Para a carga crítica de flambagem, percebe-se que o valor obtido no ensaio também é superior ao calculado, seguindo recomendações da NBR 8800:2008, cerca de 17,3%.

Assim, conclui-se que o dimensionamento descrito na NBR 8800:2008 possui uma boa margem de segurança.

É válido ressaltar também que diversos fatores podem afetar o desempenho dos elementos estruturais. Através dos ensaios, é possível obter resultados relativos ao real comportamento das peças, otimizando o dimensionamento. Portanto, os ensaios são aliados aos dimensionamentos.

### Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: 2008.

BELLEI, I. H. **Edifícios estruturais em aço - Projeto e cálculo**. São Paulo: PINI, 1994.

BORGES, R. S. F. **Análise experimental da resistência à flexão simples de vigas de aço tipo "I" compostas de perfis laminados dotados de emendas soldadas**. 2015. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

CATÁLOGO GERDAU. Catálogo técnico. Rio de Janeiro: 2013.

COOPER, S. E. **Designing steel structures: methods and cases**. Englewood Cliffs:

Prentice-Hall, 1985.

Freitas, M. S. R. et al. **Confiabilidade de Vigas Metálicas Dimensionadas pela Norma Brasileira NBR 8800**. REM – Revista Escola de Minas, vol. 60, 2, pp. 261-269, 2007.

FRUCHTENGARTEN, Jairo. **Sobre o estudo da flambagem lateral de vigas de aço por meio da utilização de uma teoria não linear geometricamente exata**. 2005. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

INTRODUÇÃO: Crescimento e vantagens do uso do aço na construção civil. Crescimento e vantagens do uso do aço na construção civil. 2006. Elaborado por Grupo CIMM. Disponível em:

<[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6334-introducao-crescimento-e-vantagens-do-uso-do-aco-na-construcao-civil#.WNhdYIUrJ0x](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6334-introducao-crescimento-e-vantagens-do-uso-do-aco-na-construcao-civil#.WNhdYIUrJ0x)>. Acesso em: 25 mar. 2017.

NARDIN, Fabiano Ângelo. A importância da estrutura metálica na construção civil. 2008. 63 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade São Francisco, Itatiba, 2008.

PFEIL, M.; PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SANTOS, Leandro Lorensi dos. Sobre a confiabilidade na flexão de vigas segundo as normas de estruturas metálicas. 2000. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

SOUZA, A. S. C. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço segundo a NBR 8800- 2008**. 1 ed. São Carlos: EDUFSCAR, 2010.