

# FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS CASTELADAS COMPOSTAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

Mário Vitor de Carvalho Soares<sup>1</sup>

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima<sup>2</sup>

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco<sup>3</sup>

André Tenchini da Silva<sup>4</sup>

## RESUMO

O presente artigo tem como objetivo analisar o fenômeno da flambagem lateral com torção em vigas casteladas com perfis do tipo IPE, padrão europeu de abas paralelas. O material utilizado em todas as vigas analisadas é o aço inoxidável ferrítico, considerado no presente estudo como material isotrópico e, ainda, com curva tensão x deformação fornecida em ensaio. Contemplou-se como imperfeição somente a imperfeição geométrica inicial das vigas, utilizando-se um valor baseado em estudos feitos previamente. Além disso, sabe-se que atualmente são usados, em projetos de aço inoxidável, modelos assumindo que tais materiais são elásticos e perfeitamente plásticos. Ora, esse comportamento é consistente com os aços carbonos convencionais, podendo fornecer resultados conservadores para aços inoxidáveis. Para efeito de comparação e com o objetivo de se comprovar os benefícios do Método das Resistências Contínuas (Continuous Strength Method) para estruturas formadas de aços inoxidáveis ferríticos, compararemos tal método com o norma europeia Eurocode.

**Palavras-chave:** Vigas casteladas. Flambagem lateral com torção. Aço inoxidável ferrítico. Método das resistências contínuas.

## LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF CASTELLATED BEAMS OF FERRITIC STAINLESS STEEL

### ABSTRACT

This paper seeks to analyze the Lateral Torsional Buckling phenomena on castellated beams with IPE type profiles. The material used in all the beams analyzed is ferritic stainless steel, considered in this study as isotropic material and also with tension-deformation curve provided under experimental test. It contemplated as imperfection only the initial geometric imperfection of the

<sup>1</sup> Engenheiro Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), RJ, Brasil.  
mariosoareseng@gmail.com

<sup>2</sup> Pós-doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra (U.COIMBRA), Coimbra, Portugal  
Professor Adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
lucianolimaujerj@gmail.com

<sup>3</sup> Pós-doutor em Engenharia Civil pela Imperial College of Science Technology And Medicine, Londres, Inglaterra  
Professor Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
vellasco@eng.uerj.br

<sup>4</sup> Doutor em Construção Metálica e Mista pela Universidade de Coimbra (UC), Coimbra, Portugal  
Professor Adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
andretsilva@gmail.com

beams, using a value based on studies done previously. Also it is known that are currently used in stainless steel designs, models assuming such materials has perfectly elastic and plastic behavior. This behavior is consistent with conventional carbon steels and can provide conservative results for stainless steel. For comparison and in order to prove the benefits of Continuous Strength Method for structures formed of ferritic stainless steels, compare this method with the Eurocode.

**Keywords:** Castellated beams. Lateral torsional buckling. Ferritic stainless steel. Continuous strength method.

## 1 INTRODUÇÃO

Elementos Estruturais metálicos submetidos a flexão têm suas capacidades de carga restringidas ao fenômeno de Flambagem Lateral com Torção. Particularmente as vigas casteladas são utilizadas quando se deseja vencer grandes comprimentos de vãos, casos em que tal tipo de estado limite último fica ainda mais evidente.

Com o crescimento do uso do aço inoxidável na prática de projetos, um estudo sobre este tipo de fenômeno em tais materiais faz se necessário. Uma vez que tal estado limite último é determinante para o calculo da carga de projeto dessas estruturas.

A base desse estudo é o dimensionamento de vigas casteladas constituídas de aço inoxidável ferrítico. A escolha das seções casteladas são feitas em função da sua considerável resistência a flexão. Além disso, será usado o Método das Resistências Contínuas, que permite avaliar de forma mais real o comportamento mecânico dos aços inoxidáveis.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Para esse estudo foram realizadas análises através do Método dos Elementos Finitos por meio do software ANSYS. Para os modelos, as seguintes considerações foram feitas:

- a) a viga foi considerada como biapoiada, com apoios restringindo seus deslocamentos em ambas as extremidades;
- b) o carregamento foi aplicado no meio do vão, localizado no topo da seção transversal;
- c) o elemento utilizado foi o SHELL181, presente na biblioteca do programa;
- d) as propriedades do Aço Inoxidável Ferrítico, considerado isotrópico, foram extraídas de ensaios descritos no artigo de Afshan, Rossi e Gardner (2013). O módulo de Young (E) foi considerado igual a 195 GPa, a tensão de escoamento ( $f_y$ ) igual a 472 MPa e a tensão última ( $f_u$ ) igual a 510,17 Mpa; e
- e) as não-linearidades geométricas (SOARES, 2014; AFSHAN; ROSS; GARDNER, 2013).

### 2.1 Vigas casteladas em estudo

Utilizaram-se 5 diferentes perfis IPE castelados, e para cada um desses perfis castelados variou-se o vão, de forma que cada perfil tivesse 10 análises. Foram analisadas portanto 50 vigas casteladas ao todo. As características geométricas de cada um dos perfis castelados foram calculadas e são mostradas abaixo:

Tabela 1: Propriedades geométricas dos perfis castelados

Perfil Laminado Castelado	Altura	Largura da mesa	Espessura da alma	Espessura da mesa	Altura do Furo	Área	Momento de maior Inércia	Momento de menor Inércia	Constante de Torção	Constante de Empena
	h (mm)	$b_f$ (mm)	$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	h'	A (mm <sup>2</sup> )	$I_y$ (mm <sup>4</sup> )	$I_z$ (mm <sup>4</sup> )	$I_t$ (mm <sup>4</sup> )	$C_w$ (mm <sup>6</sup> )
IPE200	300	100	5.6	8.5	200	2.16E+03	4.30E+07	1.42E+06	5.80E+04	3.01E+10
IPE300	450	150	7.1	10.7	300	4.12E+03	1.86E+08	6.02E+06	1.75E+05	2.90E+11
IPE400	600	180	8.6	13.5	400	6.35E+03	5.07E+08	1.31E+07	4.20E+05	1.13E+12
IPE500	750	200	10.2	16	500	8.62E+03	1.07E+09	2.14E+07	8.06E+05	2.87E+12
IPE600	900	220	12	19	600	1.15E+04	2.05E+09	3.38E+07	1.51E+06	6.54E+12

Fonte: os autores.

Abaixo, podemos ainda classificar, de acordo com o Eurocode (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2003) todas as seções transversais casteladas estudadas. Nota-se que todos os perfis, exceto o IPE200 são de classe 3. Os perfis IPE originais são considerados de classe 1. Entretanto, devido a alta relação entre  $b/t$  da alma das vigas casteladas (devido ao acréscimo de altura) faz com que tais perfis tenham esse comportamento diferenciado.

Tabela 2: Classificação dos perfis castelados

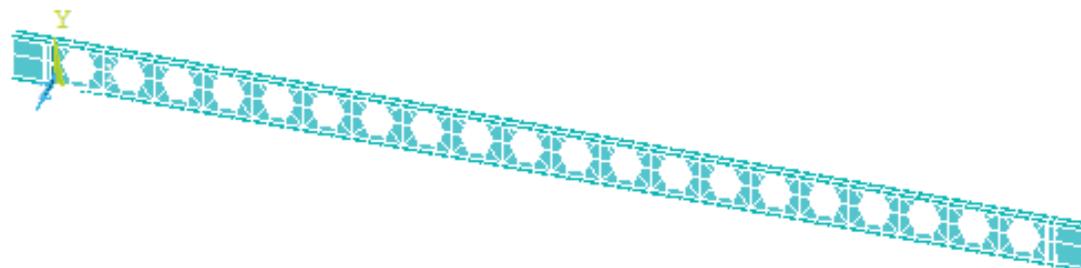
Perfil Laminado Castelado	Relação $b/t$ Alma	Classificação das Seções	Relação $b/t$ Mesa	Classificação das Seções
	$(b/t)_{alma}$	Classe <sub>alma</sub>	$(b/t)_{mesa}$	Classe <sub>mesa</sub>
IPE200	50.5	1	5.6	1
IPE300	60.4	3	5.6	1
IPE400	66.6	3	5.6	1
IPE500	70.4	3	5.6	1
IPE600	71.8	3	5.6	1

Fonte: Os autores.

Para considerar a não-linearidade geométrica, extraiu-se o resultado da análise linear com a imperfeição inicial da viga. Os valores de deslocamento máximo foram limitados a  $L/350$ , conforme estudo feito em Soares (2014).

FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS CASTELADAS  
COMPOSTAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

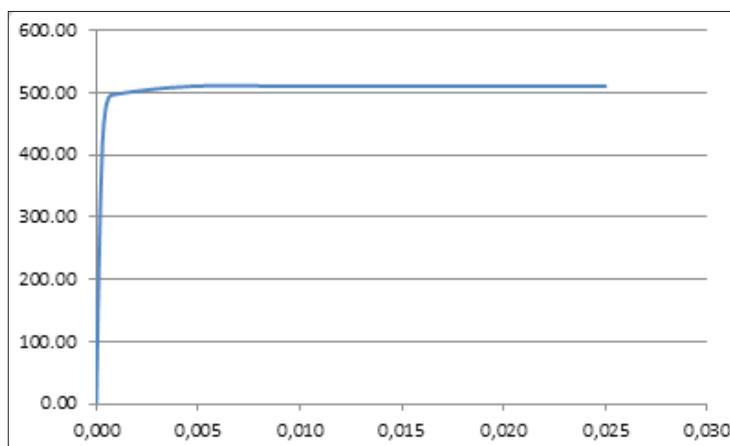
Figura 1: Visão geral do modelo em elementos finitos



Fonte: Os autores.

A não-linearidade física foi inserida nos modelos de Elementos Finitos pela curva tensão x deformação extraída dos ensaios descritos no artigo de Afshan, Rossi e Gardner (2013).

Figura 2: Curva tensão x deformação do aço inoxidável ferrítico



Fonte: Os autores.

## 2.2 Procedimentos de dimensionamento: método das resistências contínuas

Atualmente, os projetos de Aço Inoxidável são realizados supondo-o com comportamento elástico e perfeitamente plástico. Tal comportamento descreve bem o aço carbono. Entretanto, assumir tal comportamento para Aços Inoxidáveis pode gerar resultados conservadores, significando que as propriedades do material não foram aproveitadas da forma mais econômica possível. Nesse contexto, foi desenvolvido por Afshan e Gardner (2013), o Método da Resistência Contínua (Continuous Strength Method, CSM).

O Método da Resistência Contínua (AFSHAN; GARDNER, 2013) substitui o conceito de classificação de seção transversal pelo conceito da capacidade de deformação da seção transversal. Além disso, também substitui o comportamento de elástico e perfeitamente plástico por um que seja mais realístico em relação às propriedades mecânicas dos Aços Inoxidáveis, levando em conta o fenômeno de encruamento, em que há aumento da tensão na fase de deformação plástica e, portanto, aumento de resistência estrutural.

Abaixo, descreveremos como o método é utilizado para elementos sujeitos a flexão. Posteriormente, utilizaremos os resultados das análises numéricas para que sejam feitas as comparações do CSM com o Eurocode (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2003).

Inicialmente, calcula-se a esbeltez da seção transversal:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p,\min}}} = \frac{\bar{b}/t}{28.4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

A capacidade de deformação, entretanto, pode ser calculada de acordo com a seguinte equação (baseada em dados experimentais):

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0.25}{\lambda_{cs}^{3.6}} \rightarrow \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \leq \min(15, 0.1\varepsilon_u/\varepsilon_y)$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$$

O módulo de elasticidade considerado após ao escoamento, para que sejam considerados os efeitos do encruamento. A tensão última é aquela correspondente a deformação de  $0,16\varepsilon_u$ .

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.16\varepsilon_u - (\varepsilon_y + 0.002)}$$

O momento resistente da seção transversal, segundo o Método da Resistência Contínua é dado pela seguinte equação:

$$M_{y,c,Rd} = M_{y,csm,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{MO}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} \right) \right] / \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^2$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De modo a se obter efetivamente a comparação entre o Método das Resistências Contínuas e o procedimento adotado no Eurocode (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2003).

O aumento de resistência da seção transversal é considerável quando se compara os dois métodos, devido ao fenômeno de encruamento.

Tabela 3: Momentos resistentes dos perfis laminados analisados

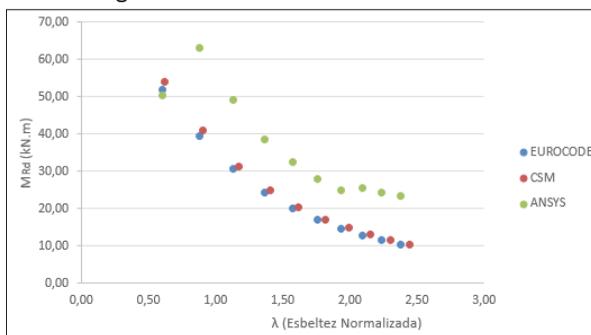
Perfil Laminado	Momento Resistente da Seção	Momento Resistente CSM	Ganho de Resistência
	$M_{Rd}$ (kN.m)	$M_{csm}$ (kN.m)	%
IPE 200	143,44	152,41	6,3%
IPE 300	389,16	430,08	10,5%
IPE 400	797,64	881,95	10,6%
IPE 500	1347,43	1492,81	10,8%
IPE 600	2147,00	2382,98	11,0%

Fonte: Os autores.

FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS CASTELADAS  
COMPOSTAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

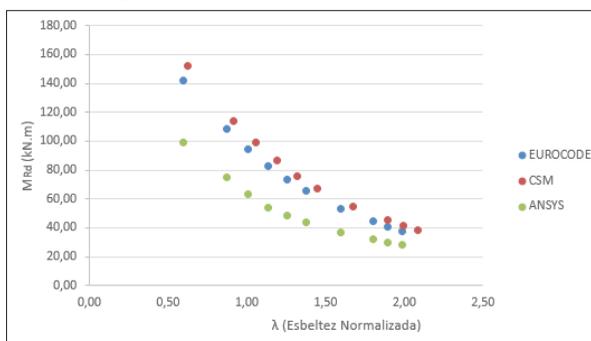
A comparação entre os três diferentes métodos utilizados ao longo das análises pode ser vista abaixo, para cada uma das seções.

Figura 3: IPE200 - Momento x Esbeltez



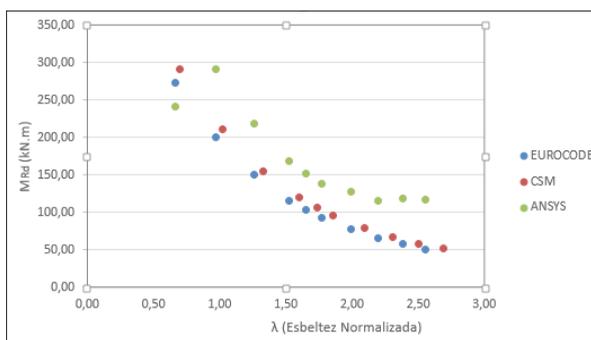
Fonte: Os autores.

Figura 4: IPE300 - Momento x Esbeltez



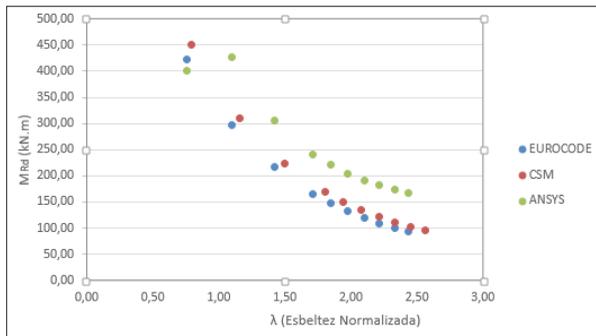
Fonte: Os autores.

Figura 5: IPE400 - Momento x Esbeltez



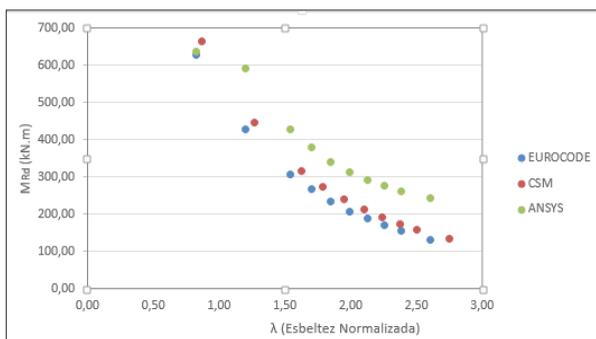
Fonte: Os autores.

Figura 6: IPE500 - Momento x Esbeltez



Fonte: Os autores.

Figura 7: IPE 600 - Momento x Esbeltez



Fonte: Os autores.

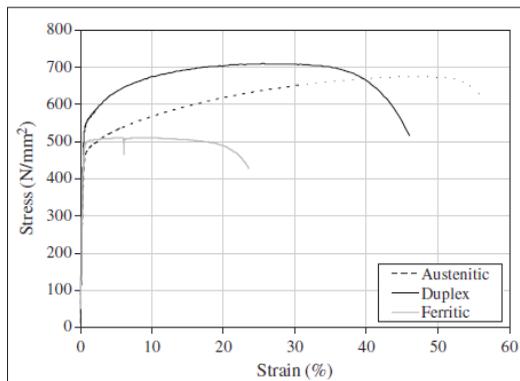
#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, nota-se que quando se levam em conta o efeito de encruamento, os resultados de cálculo são, realmente, menos conservadores que os tradicionais, como era de se esperar.

Os resultados do cálculo utilizando o CSM para o aço inoxidável ferrítico não são consideravelmente maiores do que os utilizando o método tradicional de dimensionamento. A razão disso pode ser devido ao fato de que o Aço Inoxidável Ferrítico (utilizado nesse estudo) não apresentar considerável inclinação na fase de plastificação. Isto é, o Módulo de Young na fase do encruamento (*Esh – “Straining Hardening”*), é baixo quando comparado com os outros tipos de aço inoxidável, como se pode ver no gráfico gerado por Afshan *et al.* (2013), mostrado abaixo. Sugere-se, portanto, realizar novos estudos com Vigas Casteladas com outros tipos de Aços Inoxidáveis.

FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO EM VIGAS CASTELADAS  
COMPOSTAS DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO

Figura 8: Curvas tensão x deformação dos aços inoxidáveis



Fonte: Os autores.

### REFERÊNCIAS

AFSHAN, S.; GARDNER, L. The continuous strength method for structural stainless steel design. **Thin-Walled Structures**, Leicestershire, v. 68, p. 42-49, July 2013.

AFSHAN, S.; ROSSI, B.; GARDNER, L. Strength enhancements in cold-formed structural sections: part 1: material testing. **Journal of Constructional Steel Research**, Arizona, v. 83, p. 177-188, April 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 3**: design of steel structures: part1.1: general rules and rules for buildings. Brussels, 2003.

SOARES, M. V. de C. **Comportamento de vigas casteladas constituídas de aço inoxidável ferrítico**. 2014. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.