

LARICE GOMES JUSTINO

**ANÁLISE DA FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA
POR CISALHAMENTO EM VIGAS CASTELADAS DE
AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

J96a
2018 Justino, Larice Gomes, 1993-
Análise da flambagem do montante de alma por
cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio
/ Larice Gomes Justino. – Viçosa, MG, 2018.
xii, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia estrutural. 2. Vigas casteladas. 3. Métodos
dos elementos Finitos. 4. Flambagem (mecânica).
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22 ed.

LARICE GOMES JUSTINO

**ANÁLISE DA FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA
POR CISALHAMENTO EM VIGAS CASTELADAS DE
AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


APROVADA: 09 de fevereiro de 2018.




Ricardo Hallal Fakury



José Luiz Rangel Paes



Gustavo de Souza Verissimo
(Coorientador)



José Carlos Lopes Ribeiro
(Orientador)

“Cada manhã Ele se manifesta e grande é a sua fidelidade.
Disse-me a alma: O Senhor é minha partilha, e assim nEle confio.
O Senhor é bom para quem nEle confia, para a alma que O procura.
Bom é esperar em silêncio o socorro de Deus”

Lamentações 3, 23-26

Ao meu avô Júlio José Justino,
meu maior incentivador,
que hoje intercede por mim do Céu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir desfrutar desse tempo de grandes desafios e vitórias, provendo todo o consolo e dons necessários e, por me mostrar todos os dias o quão grande é a sua fidelidade e a sua misericórdia. “dEle, por Ele, e para Ele são todas as coisas. A Ele a glória por toda a eternidade! Amém.” (Rm 11, 36).

Ao professor José Carlos Lopes Ribeiro, um grande exemplo na nobre profissão de ensinar (cf. 1Tm 4, 13-16), pela orientação, confiança, paciência e por todo o incentivo e zelo.

À professora Rita, que esteve presente todos os dias, estando em minhas orações, por todas as palavras de incentivo, por todo o cuidado e por ser exemplo em todas as esferas da vida.

Ao professor Gustavo, pelo apoio e disposição imensuráveis e pelas sugestões que contribuíram para o engrandecimento deste trabalho.

Aos meus pais, meus irmãos e demais familiares, por sempre confiarem em mim e não medirem esforços para me auxiliar e se fazerem presentes todos os dias.

Ao meu avô Júlio, pelo exemplo, por me ensinar o valor de todas as coisas, me ensinar a acumular tesouros no Céu, por me olhar devagar e me ensinar a enxergar Deus em tudo, e que hoje, O vê face a face.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou, Ricardo Laguardia, Marina Teixeira, Felipe Machado, Wellington Fernandes, João Vitor Lemes, Elder Pita, Edivaldo Pinto, Guilherme Palla, Rayane Neves, Alba Cintra, Márcia Lopes, Mateus Petruski, Vitor Minhaneli, Leonardo Mesquita, Priscilla Camargo, Roseli Guedes, Gustavo Emilio, Anderson Gusmão e André Candian, pela presença e constância.

Aos professores e funcionários do DEC, por todo o auxílio, pelos ensinamentos, pela partilha de momentos alegres e, sobretudo, pelos bons exemplos.

Ao professor Antônio Maria Claret de Gouveia por me presentear com seu livro Introdução à Engenharia de Incêndio, que contribuiu para o meu desenvolvimento na área.

Aos meus catequisandos, por me motivarem na busca pelo Céu.

Ao JSC, em especial à Equipe de Jornal, por serem meu porto seguro, minha família em Viçosa, e, por estarem sempre presentes nas minhas vitórias.

Aos meus amigos Rosilene Santos, Tayane Castro, Gláucia Moreira, Letícia Freitas, Rafael Fialho e Thiago Rosado, pela presença, pelas partilhas, por todo o cuidado e por serem remédio de vida e imortalidade (cf. Eclo 6, 16).

Ao Thiago Miranda, o auxílio (cf. Gn 2, 18) que Deus colocou em minha vida para me lembrar do Céu.

Aos meus amigos do Céu Nossa Senhora de Fátima, Santa Gianna Beretta Molla, São João Paulo II, São Frei Galvão, Santo Expedito e Nossa Senhora Aparecida, que intercedem por mim e me mostram que o Senhor não olha tanto a grandeza das minhas obras, mas o amor com que são feitas (cf. Santa Teresa de Ávila).

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificativa	3
1.4. Organização do texto.....	3
Referências bibliográficas	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Vigas casteladas	5
2.1.1. Generalidades	5
2.1.2. Modos de colapso.....	7
2.1.3. Estudos sobre flambagem do montante de alma por cisalhamento	10
2.2. Incêndio.....	13
2.2.1. Generalidades	13
2.2.2. Curva de incêndio-padrão	14
2.3. Comportamento do aço em temperatura elevada	15
2.3.1. Generalidades	15
2.3.2. Propriedades mecânicas	15
2.3.3. Propriedades térmicas	18
2.4. Trabalhos sobre vigas alveolares em situação de incêndio.....	19
Referências bibliográficas	24
ARTIGO 1 – Desenvolvimento de um modelo numérico para análise da Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio	27
1. Introdução	28
2. Desenvolvimento e Validação do modelo numérico em temperatura ambiente.....	30
2.1. Generalidades.....	30
2.2. Características do modelo numérico	30
2.3. Roteiro de análise.....	31
2.4. Resultados	32

3. Validação da hipótese de isoterma dos perfis de aço	34
4. Estudo de caso	37
4.1. Generalidades	37
4.2. Seleção dos perfis de aço	37
4.3. Temperaturas de análise	39
4.4. Roteiro de análise	40
4.5. Resultados	41
5. Conclusões	45
Agradecimentos	46
Referências bibliográficas	46
ARTIGO 2 – Modelo semiempírico para obtenção da força cortante resistente à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio	49
1. Introdução	50
2. Dimensionamento à flambagem do montante de alma por cisalhamento em situação de incêndio	52
2.1. Formulação para barra comprimida conforme ABNT NBR 14323:2013	52
2.2. Modelagem numérica	53
2.3. Proposição de um modelo semiempírico	54
3. Estudo comparativo	65
4. Conclusões	67
Agradecimentos	68
Referências bibliográficas	69
ARTIGO 3 – Análise comparativa de modelos para determinação da resistência de vigas casteladas de aço à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento adaptados para altas temperaturas	70
1. Introdução	71
2. Metodologia	73
3. Resultados e discussão	75
4. Conclusões	83
Agradecimentos	83
Referências bibliográficas	83
3. CONCLUSÕES GERAIS	85
3.1. Considerações finais	85
3.2. Sugestões para trabalhos futuros	86
Referências bibliográficas	86

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 2.1 – Esquema de fabricação de vigas casteladas.....	5
Figura 2.2 – Padrões de vigas casteladas.	6
Figura 2.3 – Colapso por mecanismo plástico.	7
Figura 2.4 – Mecanismos de colapso tipo Vierendeel, FLT e FMAV.....	8
Figura 2.5 – Ruptura do montante de alma na região da solda.	8
Figura 2.6 – Colapso por FMAC.	9
Figura 2.7 – Flambagem do montante de alma (FMAV).....	9
Figura 2.8 – Montagem do ensaio de vigas casteladas sujeitas a FMAV.	10
Figura 2.9 – Modelo de barra adotado para representação do montante de alma.	13
Figura 2.10 – Curva de incêndio-padrão.....	14
Figura 2.11 – Relação tensão-deformação para aço carbono em temperaturas elevadas.....	16

ARTIGO 1 – Desenvolvimento de um modelo numérico para análise da Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio

Figura 1 – Flambagem do montante de alma por cisalhamento de uma viga celular mista.....	29
Figura 2 – Modelo geométrico e condições de contorno (a) e de aplicação de carregamento (b) do modelo numérico do montante de alma.	31
Figura 3 – Parâmetros geométricos de vigas casteladas.	32
Figura 4 – Condições de contorno do modelo de montante de alma para análise térmica.	35
Figura 5 – Resultados da análise térmica LT-310-21 aos 15, 30, 45 e 60 min de incêndio-padrão.	36
Figura 6 – Força cortante crítica (V_{cr}).	42
Figura 7 – Força cortante de plastificação (V_p).	43
Figura 8 – Força cortante resistente (V').	44
Figura 9 – Força cortante no perfil LT-310-21 a 20 °C e a 600 °C.	45

ARTIGO 2 – Modelo semiempírico para obtenção da força cortante resistente à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio

Figura 1 – FMAV em viga castelada de aço obtida por simulação numérica.....	51
Figura 2 – Distribuição de tensões no montante de alma em vigas casteladas.	51
Figura 3 – Largura e comprimento da biela em vigas celulares obtidas a partir do perfil IPE 400.	54
Figura 4 – Comprimento de flambagem de uma barra equivalente.	55
Figura 5 – Curva $\lambda_{0,fi} \times \chi_{fi}$ para os modelos analisados e segundo a ABNT NBR 14323:2013..	56
Figura 6 – Curva $\lambda_{0,fi} \times \chi_{fi}$ ajustada para os modelos analisados.	57

Figura 7 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão Litzka.	58
Figura 8 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.	58
Figura 9 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão Peiner.	59
Figura 10 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão Litzka.....	60
Figura 11 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.....	60
Figura 12 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão Peiner.....	61
Figura 13 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para perfis com maior esbeltez.....	61
Figura 14 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão Litzka.....	62
Figura 15 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.....	62
Figura 16 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão Peiner.....	63
Figura 17 – Comparativo entre força cortante resistente para colapso por FMAV para os padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner (removendo-se os casos de plastificação).	63
Figura 18 – Comparativo entre força cortante resistente para colapso por plastificação para os padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner (removendo-se os casos de FMAV).	64
Figura 19 – Força cortante máxima no perfil LT-310-21 nas temperaturas de 20 °C e 600 °C.	64
Figura 20 – Comparativos entre as forças cortantes obtidas via MEF e via formulação.	66
Figura 21 – Comparativo entre o modo de colapso identificado com a formulação e via MEF, destacando-se o máximo e mínimo erros obtidos.	67

ARTIGO 3 – Análise comparativa de modelos para determinação da resistência de vigas casteladas de aço à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento adaptados para altas temperaturas

Figura 1 – FMAV em viga castelada de aço obtida via simulação numérica.	72
Figura 2 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulação e via MEF.	76
Figura 3 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulações e via MEF para o padrão Litzka.	77
Figura 4 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulações e via MEF para o padrão anglo-saxão.	78
Figura 5 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulações e via MEF para o padrão Peiner.	79

LISTA DE TABELAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.1 – Fatores de redução para o aço estrutural. 17

ARTIGO 1 – Desenvolvimento de um modelo numérico para análise da Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio

Tabela 1 – Condições de contorno utilizadas no modelo numérico. 31

Tabela 2 – Parâmetros geométricos e de resistência da análise experimental de Vieira (2015). 32

Tabela 3 – Parâmetros geométricos e de resistência das vigas casteladas de Redwood e Demirdjian (1998). 33

Tabela 4 – Carga última do modelo numérico em relação aos resultados experimentais de Vieira (2015). 33

Tabela 5 – Carga última do modelo numérico em relação aos resultados experimentais de Redwood e Demirdjian (1998). 34

Tabela 6 – Estudo de convergência de malha para Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 15 min (Temperatura dos gases de 738,56 °C). 35

Tabela 7 – Temperatura máxima e mínima nos modelos analisados. 37

Tabela 8 – Propriedades geométricas dos perfis analisados. 38

Tabela 9 – Parâmetros variáveis para padrão Litzka. 38

Tabela 10 – Parâmetros variáveis para padrão anglo-saxão. 39

Tabela 11 – Parâmetros variáveis para padrão Peiner. 39

Tabela 12 – Propriedade do aço estrutural nas temperaturas de análise. 40

ARTIGO 2 – Modelo semiempírico para obtenção da força cortante resistente à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio

Tabela 1 – Relação das vigas estudadas. 65

ARTIGO 3 – Análise comparativa de modelos para determinação da resistência de vigas casteladas de aço à Flambagem do Montante de Alma por cisalhamento adaptados para altas temperaturas

Tabela 1 – Relação dos modelos numéricos analisados. 73

Tabela 2 – Propriedades do aço utilizadas na análise. 74

Tabela 3 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para a temperatura ambiente. 75

Tabela 4 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para as temperaturas de 300 °C e 400 °C. 80

Tabela 5 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para as temperaturas de 600 °C e 700 °C. 81

Tabela 6 – Razão entre os resultados obtidos com a formulação ajustada de Wang *et al.* (2016) e com o modelo numérico. 82

RESUMO

JUSTINO, Larice Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Análise da flambagem do montante de alma por cisalhamento em vigas casteladas de aço em situação de incêndio.** Orientador: José Carlos Lopes Ribeiro. Coorientadores: Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga e Gustavo de Souza Veríssimo.

As vigas casteladas são obtidas a partir de perfis I cortados longitudinalmente na alma, deslocados em seu comprimento e soldados, produzindo aberturas hexagonais ou octogonais, quando entre as partes são introduzidas chapas expansoras, promovendo assim o aumento da inércia dos perfis sem alteração significativa do peso. Dessa forma, essas vigas são indicadas para grandes vãos e situações em que os estados limites de serviço condicionam o dimensionamento, além de possuírem forte apelo arquitetônico, facilitando a passagem das instalações prediais pelas aberturas e consequente redução da altura da edificação. Porém, a presença de aberturas na alma modifica a distribuição de tensões na alma do perfil castelado em relação ao perfil de alma cheia, reduzindo sua capacidade resistente sob determinadas condições de carregamento, podendo ocasionar fenômenos de instabilidade próprios das vigas casteladas. Esses comportamentos podem ser ainda mais alterados em situação de incêndio, uma vez que, com o aumento da temperatura, o aço tem seu módulo de elasticidade e sua resistência degradadas. Assim sendo, realizou-se um estudo numérico, com o uso do software ABAQUS, de vigas casteladas de aço nos padrões Litzka, Peiner e anglo-saxão submetidas a altas temperaturas, o que permitiu delinear o comportamento dessas vigas quanto à flambagem do montante de alma em situação de incêndio. Os resultados obtidos na análise numérica foram validados com os obtidos experimentalmente por Vieira (2015)¹ e por Redwood e Demirdjian (1998)² para a temperatura ambiente, e foram utilizados para proposição de uma formulação para dimensionamento de tais vigas em situação de incêndio, com base nas proposições da norma ABNT NBR 14323:2013 e na analogia com o modelo de biela.

¹ VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço.** 209 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

² REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. **Castellated beam web buckling in shear.** Journal of Structural Engineering, v. 124, p. 1202-1207, 1998.

ABSTRACT

JUSTINO, Larice Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Analysis of web-post buckling by shear in castellated steel beams in fire.** Adviser: José Carlos Lopes Ribeiro. Co-advisers: Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga and Gustavo de Souza Veríssimo.

The castellated steel beams are manufactured from I-section steel beams that are cut longitudinally along the web and then web-post are re-welded together. The obtained castellated steel beam has hexagonal or octagonal openings and so a higher inertia than the original beam. Therefore, these beams are suitable for structures with long spans and for situations where the serviceability limit state is critical. They also have strong architectural appeal and allow service integration to be installed within the beam depth, which reduces the height of the building. Due to the openings in the web, the stress distribution is modified in relation to the solid web beam and the resistance is reduced. Thus, local failure modes may occur in castellated beams. In fire, these behaviors can be further modified, because, with the elevation of the temperature, the elasticity modulus and the strength of the steel are degraded. Therefore, a numerical study of Litzka, Peiner and Anglo-Saxon castellated steel beams exposed to elevated temperatures was done with the software ABAQUS. The results of numerical analysis were validated with experimental results at ambient temperature (REDWOOD and DEMIRDJIAN, 1998; VIEIRA, 2015), and had been used to propose a formulation for the design of castellated steel beams in fire, based on the propositions of ABNT NBR 14323:2013 and the strut model analogy.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. GENERALIDADES

As vigas com aberturas sequenciais na alma, ditas vigas alveolares, são constituídas por perfis I cortados longitudinalmente na alma, deslocados em seu comprimento e soldados, produzindo-se assim, aberturas em formato hexagonal (denominadas vigas casteladas) ou em formato circular (vigas celulares).

O uso desse tipo de viga iniciou-se na Europa, por volta da década de 1940, devido à necessidade de perfis com altura superior ou intermediária à dos perfis laminados disponíveis na época. Com o passar do tempo, por conta do encarecimento da mão de obra de fabricação, essa solução passou a ser antieconômica. A partir da década de 1990, com o desenvolvimento na área de automação industrial e em função de suas vantagens arquitetônicas e estruturais, essa solução voltou a ser competitiva.

As vigas alveolares são apropriadas para situações em que é necessária maior inércia e baixo peso, sendo indicadas para grandes vãos e para situações em que os estados limites de serviço condicionam o dimensionamento. Possuem, também, forte apelo arquitetônico devido às possibilidades alcançadas com os mais diversos tipos de aberturas, além de facilitarem a passagem das instalações prediais através da estrutura, permitindo assim, diminuir o pé-direito e, conseqüentemente, a altura total do edifício.

As aberturas na alma de uma viga alveolar levam à modificação da distribuição de tensões na alma em relação ao que se observa em um perfil de alma cheia, reduzindo sua capacidade resistente sob determinadas condições de carregamento, podendo, inclusive, ocasionar fenômenos de instabilidade local.

Ultimamente, as formas de colapso e os métodos de dimensionamento de vigas alveolares têm sido largamente estudados à temperatura ambiente. Dada a possibilidade do uso difundido de vigas alveolares, em especial de vigas casteladas, e a crescente preocupação com a segurança das estruturas, torna-se indispensável o estudo desses elementos estruturais também em situação de incêndio, visto que o aço tem sua resistência e rigidez

degradadas quando submetido a altas temperaturas, o que pode levar tais vigas à ruína ou a estados de deformações excessivas.

Segundo Wong, Burgess e Plank (2010), Wang, P., Wang, X. e Liu (2014) e Nadjai *et al.* (2016), em situação de incêndio, o módulo de elasticidade do aço reduz mais rapidamente que a resistência, o que faz com que o perfil fique mais propenso a falhas por instabilidade local. Neste sentido, a flambagem do montante de alma tende a ser o modo de colapso predominante em situação de incêndio, principalmente em vigas casteladas de alma esbelta.

Como a flambagem do montante de alma por cisalhamento é um mecanismo de falha importante em vigas casteladas em situação de incêndio, fez-se o estudo de vigas casteladas submetidas a altas temperaturas, através da geração de modelos numéricos com o auxílio do software ABAQUS, visando à adaptação da formulação presente na norma ABNT NBR 14323:2013 para barras comprimidas, uma vez que o modo de colapso em estudo pode ser associado a um modelo de biela.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consistiu em analisar a capacidade resistente de vigas casteladas de aço no Estado Limite Último de flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV) em situação de incêndio.

Os seguintes objetivos específicos foram delineados para se atingir o objetivo geral:

- obter a capacidade resistente à força cortante dessas vigas em altas temperaturas, por meio de análise numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF);
- adaptar as equações existentes, tendo em vista a variação das propriedades do aço com o aumento da temperatura e avaliar a validade das mesmas para vigas casteladas em situação de incêndio, com base nos resultados dos modelos numéricos;
- realizar uma análise comparativa das formulações existentes para obtenção da capacidade resistente à força cortante devido à flambagem do montante de alma por cisalhamento em vigas casteladas em altas temperaturas.

1.3. JUSTIFICATIVA

As vigas alveolares, entre elas, as vigas casteladas, além de possuírem uma estética atraente, são capazes de vencer vãos maiores que os perfis laminados tradicionais, permitindo ainda a redução do pé-direito da edificação por propiciarem, mais facilmente, a passagem das instalações prediais pelas aberturas nas almas.

Porém, mesmo com as vantagens desse elemento construtivo, um obstáculo para a disseminação de seu uso no Brasil é a ausência de formulações abordadas em normas técnicas para o seu dimensionamento, seja em temperatura ambiente, seja em situação de incêndio. O que se deve, muito provavelmente, ao fato de essas vigas terem caído em desuso e somente nos anos atuais, por conta do desenvolvimento da automação, o seu uso tenha sido retomado, bem como as pesquisas com esses perfis.

Dadas as vantagens do uso de vigas casteladas, a possibilidade do uso difundido das mesmas e a crescente preocupação com a segurança das edificações, faz-se necessário o estudo do comportamento destas em situação de incêndio, assim como a compilação desse estudo em formulações de fácil aplicação para fins de dimensionamento.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão de literatura sobre as vigas casteladas, quanto às propriedades geométricas, às aplicações e aos modos de colapso, em especial o colapso por flambagem do montante de alma por cisalhamento. Apresenta-se também algumas informações sobre incêndio, conforme as normas técnicas vigentes no Brasil, abordando o comportamento do aço em temperaturas elevadas e trabalhos sobre vigas alveolares em situação de incêndio.

Na sequência são apresentados três artigos que envolvem o desenvolvimento e as conclusões do presente trabalho.

No primeiro artigo, apresenta-se o modelo numérico proposto para o estudo da FMAV em vigas casteladas em temperatura ambiente e em situação de incêndio, abordando os parâmetros utilizados para validação do modelo em temperatura ambiente e a

comprovação da hipótese de distribuição homogênea de temperatura ao longo da viga, bem como o estudo de variação de parâmetros realizado.

No segundo artigo, apresenta-se o modelo semiempírico proposto com base nos resultados numéricos e seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 14323:2013 para barras submetidas à compressão, além de um comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente, através da modelagem numérica via MEF e através do modelo semiempírico proposto.

O terceiro artigo corresponde a uma análise comparativa entre as formulações existentes e a formulação proposta no presente trabalho, para a obtenção da força resistente de vigas casteladas em situação de incêndio sujeitas ao colapso por FMAV em comparação a resultados numéricos.

No capítulo 3 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

NADJAI, A.; PETROU, K.; HAN, S.; ALI, F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 579-588, 2016.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability and Ductility of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010.

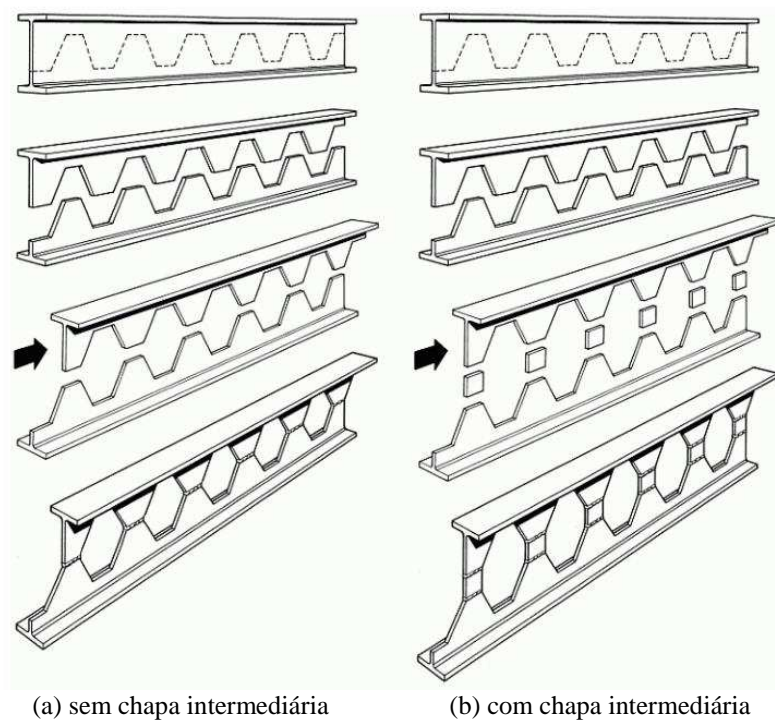
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. VIGAS CASTELADAS

2.1.1. Generalidades

As vigas casteladas são usualmente fabricadas a partir do corte longitudinal em ziguezague da alma de um perfil I (laminado ou soldado), seguido do deslocamento das partes de certo comprimento e soldagem, de forma a produzir uma viga de maior altura, com aberturas hexagonais na alma (Figura 2.1 a). Eventualmente, podem ser inseridas chapas entre as partes soldadas, gerando aberturas octogonais (Figura 2.1 b).

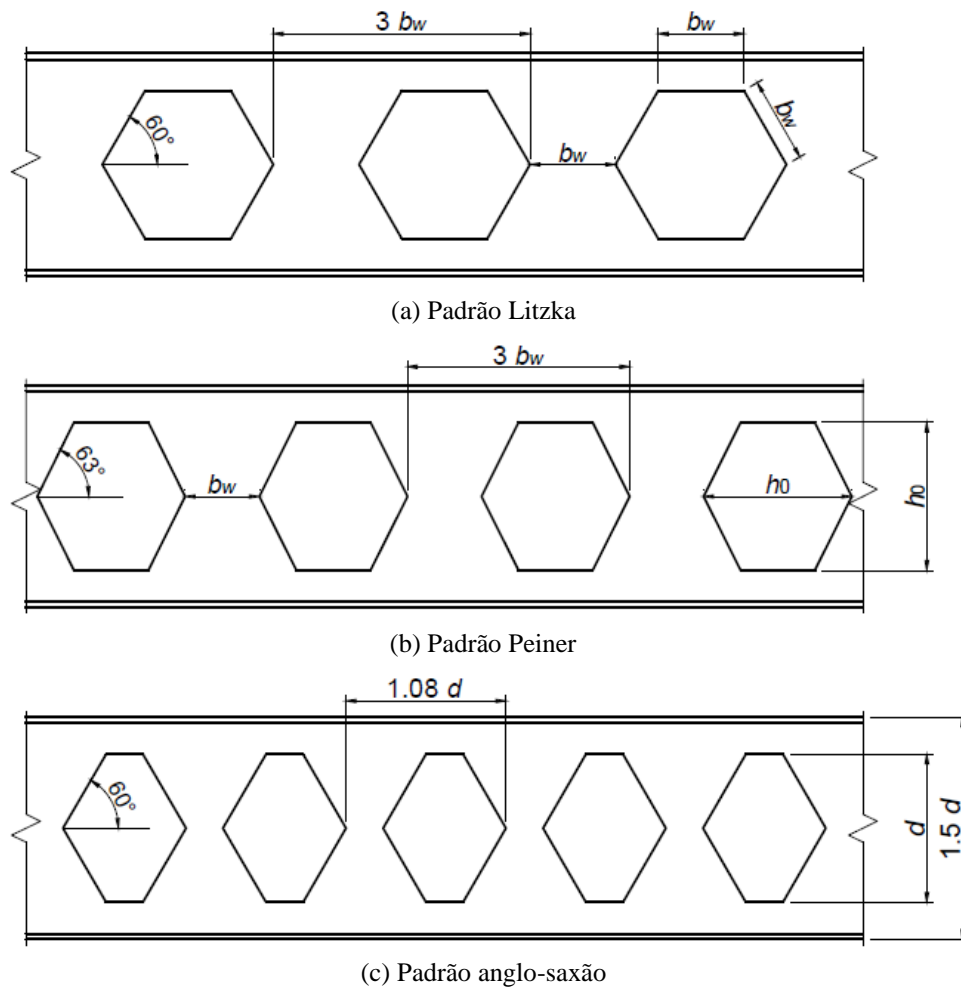
Figura 2.1 – Esquema de fabricação de vigas casteladas.



Fonte: Grünbauer (2016).

Segundo Vieira (2015), em função do traçado do corte, as vigas casteladas podem ser produzidas com diferentes tipologias de aberturas, variando-se a distância entre as aberturas e o ângulo das aberturas. Ao longo do tempo, três tipologias de vigas casteladas tornaram-se mais usuais, a saber, o padrão Litzka, o padrão Peiner e o padrão anglo-saxão (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Padrões de vigas casteladas.



Fonte: Vieira (2015).

Na Figura 2.2 são destacadas as seguintes propriedades geométricas:

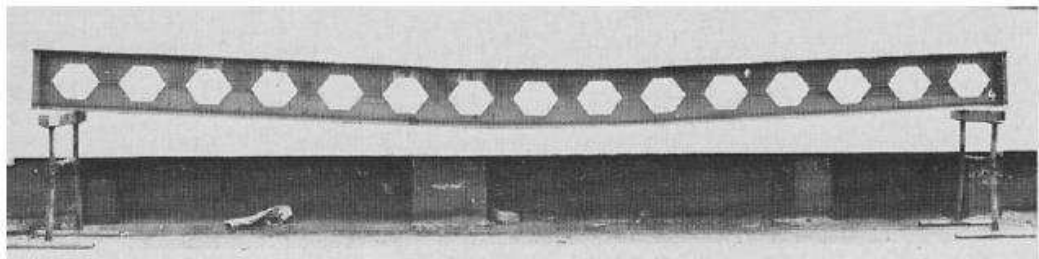
- b_w é a menor largura do montante de alma;
- h_0 é a altura da abertura;
- d é a altura da viga original, sendo que, após a expansão, a viga castelada no padrão anglo-saxão adquire a altura igual a $1,5 d$.

Essa solução resulta em um aumento da inércia da viga, sem aumento no peso. Porém, a presença das aberturas modifica o comportamento estrutural da viga, pois altera a distribuição de tensões ao longo da altura da mesma, influenciando, assim, os modos de colapso.

2.1.2. Modos de colapso

Segundo Demirdjian (1999), os modos de colapso das vigas casteladas estão intimamente associados à geometria da viga, à esbeltez da alma, às aberturas, ao tipo de carregamento e à presença de suportes laterais. Atualmente, os modos de colapso (da Figura 2.3 até a Figura 2.6) identificados são: mecanismo plástico, mecanismo Vierendeel, flambagem lateral com torção (FLT), escoamento do montante de alma por esforços combinados e flambagem do montante de alma por compressão (FMAC) ou por cisalhamento (FMAV).

Figura 2.3 – Colapso por mecanismo plástico.



Fonte: Kanning³ (1975, *apud* Silveira, 2011).

O colapso por mecanismo plástico (Figura 2.3) se dá pelo escoamento das seções $tê$ acima e abaixo das aberturas e ocorre normalmente no centro do vão, em vigas biapoizadas submetidas à flexão.

O colapso por mecanismo Vierendeel (Figura 2.4.a) é caracterizado pela formação de quatro rótulas plásticas nos cantos das aberturas, proporcionando um deslocamento vertical relativo entre as bases de aberturas sucessivas. Esse mecanismo ocorre em vigas sujeitas a altos valores de momento fletor e força cortante combinados.

A flambagem lateral com torção (Figura 2.4.b) é caracterizada pelo movimento da viga para fora do plano da alma, associada a uma torção da seção. Ocorre em vigas com comprimento lateral destravado insuficiente para conter a mesa comprimida.

³ KANNING, W. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen über den Einfluß der schnitfführung von Wabenträgern auf deren Traglast*. 1975.

Figura 2.4 – Mecanismos de colapso tipo Vierendeel, FLT e FMAV.



(a) Mecanismo Vierendeel

(b) Flambagem lateral com torção

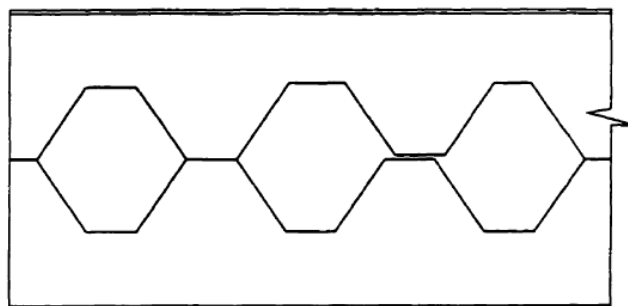


(c) Flambagem do montante de alma por cisalhamento

Fonte: Vieira (2015).

Outro mecanismo de falha é a ruptura do montante de alma por cisalhamento na região da solda (Figura 2.5), que ocorre quando a tensão cisalhante horizontal atinge a tensão de escoamento do material. Esse modo de ruptura ocorre mais frequentemente em vigas onde a relação entre o comprimento da solda e a distância entre as aberturas é pequena.

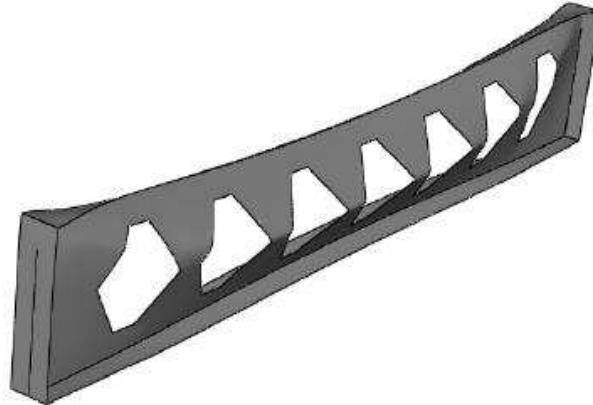
Figura 2.5 – Ruptura do montante de alma na região da solda.



Fonte: Demirdjian (1999).

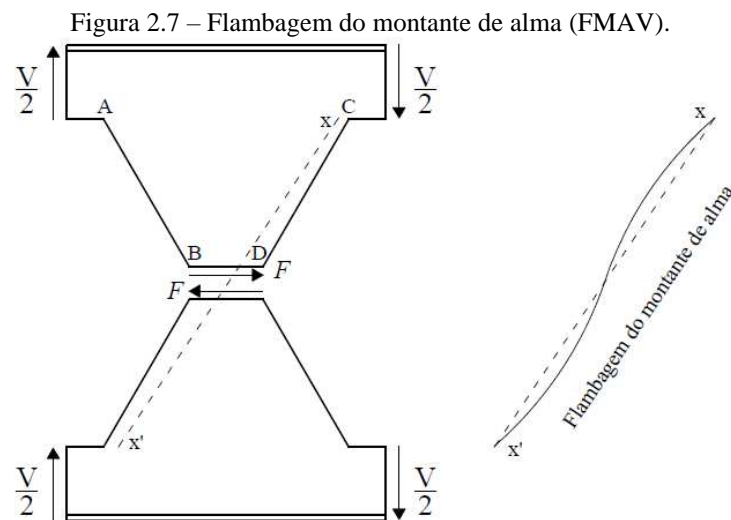
A flambagem do montante de alma por compressão (Figura 2.6) ocorre quando há um deslocamento lateral do montante de alma, sem a ocorrência de torção. Esse modo de colapso foi observado por Toprac e Cooke (1959) e por Hosain e Speirs (1973) e estudado recentemente por Menkulasi *et al.* (2017), podendo ser prevenido com o uso adequado de enrijecedores ou com um apropriado dimensionamento da alma.

Figura 2.6 – Colapso por FMAC.



Fonte: Vieira (2015).

Quanto à flambagem do montante de alma por cisalhamento (Figura 2.4.c), observa-se, por analogia a uma viga Vierendeel, que o montante de alma possui forças internas F , conforme a Figura 2.7. A força cisalhante F sollicita a borda AB à tração e a borda CD à compressão, podendo, então, ocasionar a flambagem do montante de alma, caracterizada pelo deslocamento lateral do montante de alma acompanhado de curvatura dupla ao longo da altura.



Fonte: Adaptado de Kerdal e Nethercot (1984).

2.1.3. Estudos sobre flambagem do montante de alma por cisalhamento

Entre os estudos mais recentes a respeito de vigas casteladas sujeitas à flambagem do montante de alma por cisalhamento, tem-se o estudo desenvolvido por Vieira (2015).

Vieira (2015) fez uma análise experimental de 14 vigas casteladas nos padrões Litzka, anglo-saxão e Litzka com chapa expansora, produzidas a partir de perfis laminados W 310x21, W 310x28,3 e W 310x52, de aço ASTM A-572 grau 50, com resistência nominal ao escoamento de 345 MPa.

Na Figura 2.8 mostra-se a montagem de um dos ensaios realizados. As vigas estavam biapoiadas e submetidas a um carregamento concentrado no meio do vão, onde foi usado um vínculo de garfo para impedir o deslocamento da viga fora de seu plano e a flambagem lateral com torção.

Figura 2.8 – Montagem do ensaio de vigas casteladas sujeitas a FMAV.



Fonte: Vieira (2015).

Foi então desenvolvido um modelo numérico das vigas e outro do montante de alma no software ABAQUS, ambos calibrados com os valores experimentais. Com esses modelos foram feitos estudos de variação de parâmetros, onde se estudaram os efeitos da variação da esbeltez da alma, da resistência ao escoamento do aço e do nível das imperfeições iniciais. Com base nos resultados obtidos, foi proposto um modelo semiempírico para obtenção da força cortante resistente nominal à FMAV (V_n) de vigas casteladas (Equação 2.1).

$$V_n = \gamma_0 \chi V_p \quad (2.1)$$

onde: γ_0 é um coeficiente de ponderação, ajustado empiricamente, que leva em conta as incertezas do modelo semiempírico em relação ao modelo numérico e do modelo numérico em relação ao modelo experimental;

V_p é a força cortante de plastificação do modelo (Equação 2.2);

χ é o fator adimensional de força cortante (Equação 2.3).

$$V_p = \alpha b_w y_0 \left(\frac{t_w}{p} \right)^m f_y \quad (2.2)$$

onde: b_w é a largura mínima do montante de alma;

y_0 é a distância entre o centro de gravidade do banzo e o eixo da viga;

t_w é a espessura da alma;

p é o passo da castelação (a distância entre centros de alvéolos adjacentes);

f_y é a resistência ao escoamento do aço;

m e α são coeficientes de regressão. Para os padrões Litzka e Peiner: $m = 1,223$ e

$\alpha = 1,609$ e para o padrão anglo-saxão $m = 1,148$ e $\alpha = 2,422$.

$$\chi = \begin{cases} \chi_{pl} = 1 & \text{para } \lambda < \lambda_p \\ \chi_{inel} & \text{para } \lambda_p < \lambda < \lambda_r \\ \chi_{cr} & \text{para } \lambda > \lambda_r \end{cases} \quad (2.3)$$

onde: χ_{pl} é o fator de força cortante de plastificação;

χ_{inel} é o fator de força cortante de flambagem inelástica, dado pela Equação (2.4) para os padrões Litzka e Peiner e, pela Equação (2.5), para o padrão anglo-saxão;

χ_{cr} é o fator de força crítica de flambagem (Equação 2.6);

λ_p e λ_r são os limites de esbeltez que separam o regime de plastificação do regime de flambagem inelástica e o regime de flambagem inelástica do regime de flambagem elástica, respectivamente.

$$\chi_{inel} = \frac{\lambda_r - \chi_r \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} - \frac{\chi_p - \chi_r}{\lambda_r - \lambda_p} \lambda \quad (2.4)$$

$$\chi_{inel} = \chi_r + (\chi_p - \chi_r) \left(\frac{\lambda_r - \lambda}{\lambda_r - \lambda_p} \right)^2 \quad (2.5)$$

onde χ_p deve ser tomado igual à unidade e χ_r é igual ao χ_{cr} obtido pela Equação (2.6), fazendo $\lambda = \lambda_r$.

$$\chi_{cr} = x_1 \left(\frac{E}{f_y} \right)^{x_2} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{x_3} \quad (2.6)$$

em que os parâmetros x_1 , x_2 e x_3 são, respectivamente, iguais a 27,515; 0,947 e 1,830 para os padrões Litzka e Peiner, e 23,416; 0,883 e 1,825 para o padrão anglo-saxão.

Segundo o autor, o cálculo da capacidade resistente à FMAV deve ser feito em quatro passos principais, conforme apresentado a seguir:

- a) cálculo da esbeltez do montante (λ);
- b) cálculo dos índices de esbeltez limite (λ_p e λ_r), descritos em função da relação entre a imperfeição inicial e a altura da viga castelada e em função da resistência ao escoamento do aço;
- c) comparação da esbeltez do montante com os índices de esbeltez limite e obtenção do fator de força cortante χ , conforme a Equação (2.3);
- d) obtenção da força cortante resistente nominal V_n , conforme a Equação (2.1).

A esbeltez do montante de alma é dada por:

$$\lambda = \frac{l_e \sqrt{12}}{t_w} \quad (2.7)$$

em que:

$$l_e = K \frac{\sqrt{b_w^2 + h_0^2}}{2} \quad (2.8)$$

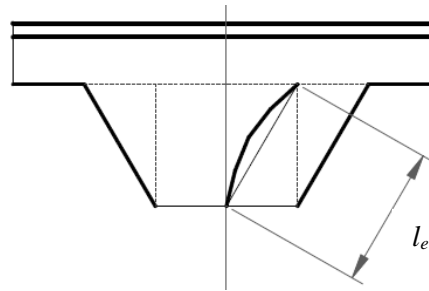
onde: l_e é o comprimento efetivo de uma barra equivalente (Figura 2.9);

b_w é a largura mínima do montante de alma;

h_0 é a altura do alvéolo;

K é o coeficiente de flambagem, que, de acordo com a literatura, pode ser considerado igual a 1.

Figura 2.9 – Modelo de barra adotado para representação do montante de alma.



Fonte: Vieira (2015).

Para vigas com chapa expansora:

$$K = \frac{h_0 + h_p}{h_0} \quad (2.9)$$

onde h_p é a altura da chapa expansora.

Por fim, após a obtenção da força cortante resistente nominal, devem-se utilizar os coeficientes de ponderação da resistência das normas pertinentes para obtenção da força cortante resistente de cálculo.

2.2. INCÊNDIO

2.2.1. Generalidades

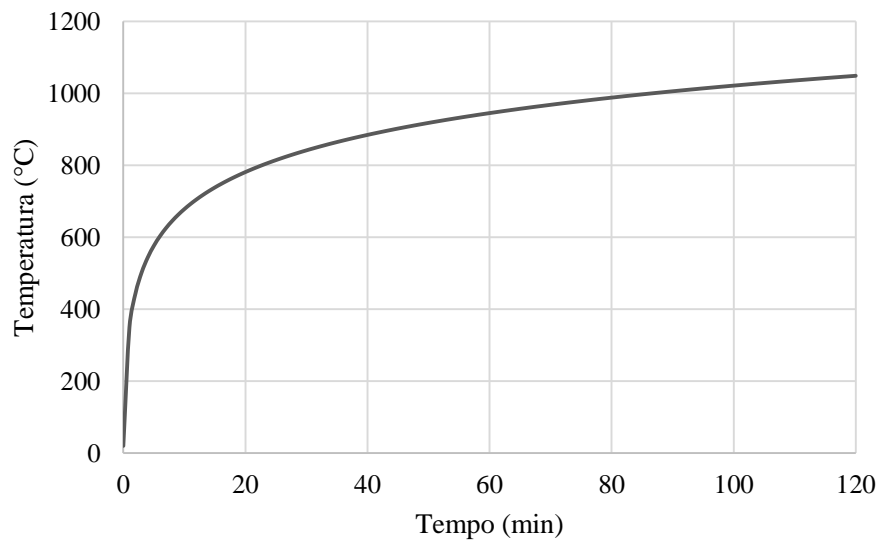
Apesar de os incêndios serem incidentes relativamente raros, sua ocorrência pode ter como consequências perdas humanas e materiais significativas. Configura-se então, como dever dos profissionais ligados à construção civil, zelar pela proteção da vida, adotando medidas de proteção e controle do sinistro, bem como elaborar projetos em que seja prevista a rápida evacuação dos ambientes.

Segundo Camargo (2010), a verificação das estruturas em situação de incêndio é necessária, pois as elevadas temperaturas provocam a degeneração das propriedades dos materiais e conseqüentemente a redução de sua capacidade resistente e rigidez. Assim, a estrutura pode perder condições de suportar as ações atuantes e sofrer colapso total ou parcial.

2.2.2. Curva de incêndio-padrão

Para o estudo das estruturas em situação de incêndio utiliza-se a curva de incêndio-padrão (Figura 2.10), para a qual se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas seja sempre crescente com o tempo e, além disso, independente das características do ambiente e da carga de incêndio.

Figura 2.10 – Curva de incêndio-padrão.



Fonte: ABNT NBR 14432:2001.

A norma brasileira ABNT NBR 14432:2001 disponibiliza a seguinte equação logarítmica (Equação 2.10), que descreve a curva de incêndio-padrão:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (2.10)$$

em que: θ_0 é a temperatura do ambiente antes do incêndio, normalmente tomada como 20 °C;

t é o tempo (em minutos);

θ_g é a temperatura dos gases no ambiente em chamas, em graus Celsius, no tempo t .

Ressalta-se que essa curva não representa um incêndio real. Portanto, todas as conclusões obtidas por meio dela devem ser analisadas com cuidado. O que ocorre na prática, por simplicidade, é o emprego da curva de incêndio-padrão associada a um tempo arbitrado por consenso técnico para determinar a temperatura de dimensionamento, sendo esse, o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

O TRRF é o tempo em que a máxima temperatura será atingida durante um incêndio. Seu valor é estabelecido em normas e códigos de acordo com a ocupação/uso a que se destina a edificação e a altura da mesma, levando em conta o risco de incêndio e as consequências que o mesmo pode vir a causar devido a uma falha estrutural.

2.3. COMPORTAMENTO DO AÇO EM TEMPERATURA ELEVADA

2.3.1. Generalidades

Consoante a Silva (2001), a exposição dos materiais estruturais, tais como o aço e o concreto, a altas temperaturas degenera as suas características físicas e químicas, causando redução da resistência e da rigidez, o que deve ser levado em conta no dimensionamento das estruturas, em situação de incêndio.

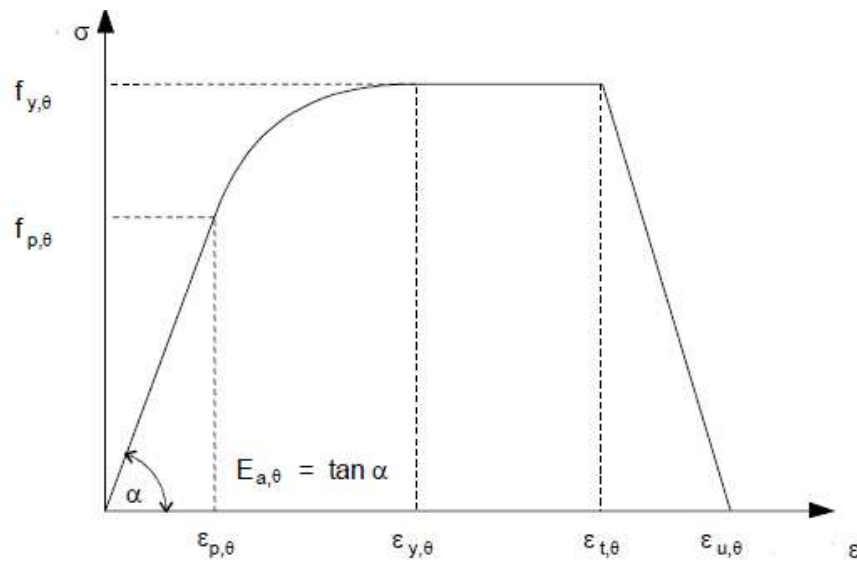
A seguir, são apresentadas as propriedades térmicas e mecânicas do aço estrutural conforme a elevação da temperatura, de acordo com a norma ABNT NBR 14323:2013.

2.3.2. Propriedades mecânicas

O diagrama tensão-deformação do aço pode ser obtido de acordo com o EN 1993-1-2:2005, para uma taxa de aquecimento entre 2 °C/min e 50 °C/min, utilizando-se o conjunto de expressões a seguir (Figura 2.11):

Figura 2.11 – Relação tensão-deformação para aço carbono em temperaturas elevadas.

Varição da deformação	Tensão σ	Módulo de elasticidade tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	



Fonte: Adaptado de EN 1993-1-2:2005.

onde: α é o ângulo de inclinação do trecho elástico inicial, que define o módulo de elasticidade em temperatura elevada $E_{a,\theta}$;

$f_{p,\theta}$ é o limite de proporcionalidade em temperatura elevada;

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento em temperatura elevada;

$\varepsilon_{p,\theta}$ é a deformação correspondente ao limite de proporcionalidade $f_{p,\theta}$;

$\varepsilon_{y,\theta}$ é a deformação correspondente ao início do patamar de escoamento;

$\varepsilon_{t,\theta}$ é deformação no final da plastificação;

$\varepsilon_{u,\theta}$ é a deformação última.

A resistência ao escoamento ($f_{y,\theta}$), o limite de proporcionalidade ($f_{p,\theta}$) e o módulo de elasticidade do aço estrutural ($E_{a,\theta}$) em temperatura elevada podem ser obtidos pelas Equações 2.11, 2.12 e 2.13, respectivamente:

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} \quad (2.11)$$

$$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y} \quad (2.12)$$

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E} \quad (2.13)$$

onde: f_y é a resistência ao escoamento do aço a 20 °C;

E é o módulo de elasticidade do aço a 20 °C;

$k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ são fatores de redução que podem ser obtidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Fatores de redução para o aço estrutural.

Temperatura do aço (°C) θ_a	Fator de redução da resistência ao escoamento $k_{y,\theta}$	Fator de redução do limite de proporcionalidade $k_{p,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,897	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

Fonte: EN 1993-1-2:2005.

Para valores de temperatura intermediários aos valores apresentados na Tabela 2.1, é permitido que se faça interpolação linear.

A norma brasileira ABNT NBR 14323:2013 apresenta valores semelhantes aos da Tabela 2.1 para os fatores de redução do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento.

A massa específica do aço pode ser considerada independente da temperatura e igual a:

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad (2.14)$$

2.3.3. Propriedades térmicas

O calor específico do aço (c_a , em J/kg°C) pode ser determinado, em função da temperatura do aço (θ_a , em °C), pelas seguintes expressões:

- para $20 \text{ °C} \leq \theta_a < 600 \text{ °C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (2.15)$$

- para $600 \text{ °C} \leq \theta_a < 735 \text{ °C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (2.16)$$

- para $735 \text{ °C} \leq \theta_a < 900 \text{ °C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (2.17)$$

- para $900 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$:

$$c_a = 650 \quad (2.18)$$

A condutividade térmica (λ_a , em W/m°C) pode ser determinada de acordo com a temperatura do aço (θ_a , em °C), por:

- para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (2.19)$$

- para $800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \quad (2.20)$$

2.4. TRABALHOS SOBRE VIGAS ALVEOLARES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Como não existem muitos trabalhos consistentes a respeito de vigas casteladas em situação de incêndio, são descritos também trabalhos relevantes sobre vigas celulares em situação de incêndio.

Bailey (2004) ensaiou vigas celulares simétricas e perfis de alma cheia de mesma altura, sem proteção contra fogo e também com diferentes espessuras de pintura intumescente à base de água e à base de solvente, submetidas a altas temperaturas. Observou-se que, em vigas sem proteção, as temperaturas da alma da viga de alma cheia foram superiores à temperatura no montante de alma da viga celular, o mesmo ocorreu para as mesas inferiores. Já com o uso de proteção intumescente, observou-se que as temperaturas no montante de alma da viga alveolar foram superiores às temperaturas obtidas em posições equivalentes no perfil de alma cheia, o que se deve à expulsão da pintura intumescente das bordas das aberturas, com o aumento de temperatura. No entanto, as conclusões obtidas por Bailey (2004) devem ser vistas com cautela, visto que houve alguma deficiência na medição realizada pelos termopares, demonstrada pelo fato de que as temperaturas registradas nos elementos estruturais, em alguns instantes do ensaio, são superiores às temperaturas do forno.

Lawson, Oshatogbe e Newman⁴ (2006, *apud* Wong, Burgess e Plank, 2009) forneceram diretrizes de dimensionamento de vigas celulares mistas e não-mistas, tanto em

⁴ LAWSON, R. M.; OSHATOGBE, D.; NEWMAN, G.M. **Design of FABSEC cellular beams in non-composite and composite applications for both normal temperature and fire engineering conditions**. Cellular Beam Software: FBeam 2006 design guide, Fabsec Limited publication, 2006.

temperatura ambiente quanto em situação de incêndio. O modelo em situação de incêndio é baseado em modificações nos parâmetros de resistência e rigidez usados em temperatura ambiente.

Nadjai *et al.* (2007) realizaram um estudo numérico e experimental do comportamento de pisos mistos com vigas celulares em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Todas as rupturas últimas dos experimentos foram associadas à flambagem do montante de alma das vigas celulares. Os resultados dos ensaios foram utilizados para calibrar um modelo numérico, que se demonstrou capaz de simular com precisão o comportamento de vigas celulares mistas em temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Bake e Bailey (2007) estudaram o comportamento de vigas celulares isoladas e mistas em temperatura ambiente e em situação de incêndio através de modelagem computacional com os softwares ABAQUS e ANSYS. Os autores concluíram que as condições de contorno têm grande influência no comportamento das vigas celulares ao testarem o aumento do suporte lateral nas vigas, o que retarda a flambagem global, mas potencializa a flambagem local. Concluíram também que a imperfeição inicial das vigas tem maior influência em temperatura ambiente do que em situação de incêndio, pois se observou que até mesmo altos valores de imperfeição não afetam o comportamento da viga em situação de incêndio, ou seja, os deslocamentos causados por altas temperaturas se demonstraram mais pronunciados que o efeito da imperfeição inicial.

Wald *et al.* (2010) descreveram o teste de incêndio realizado no edifício Mokrsko, que possuía vigas casteladas mistas padrão ArcelorMittal AngelinaTM. Os autores concluíram que o pré-dimensionamento realizado com adaptação simples dos métodos de dimensionamento das vigas Angelina fornece uma previsão razoável do comportamento das mesmas, embora as tensões na estrutura sejam altamente influenciadas pelo alongamento ou encurtamento dos elementos.

Wong, Burgess e Plank (2010a) modificaram os modelos analíticos para cálculo de vigas celulares mistas em temperatura ambiente para a situação de incêndio, de forma a abarcar a modificação das características mecânicas dos elementos estruturais com o aumento da temperatura. Um modelo em elementos finitos, utilizando o software ABAQUS, foi validado com os resultados dos experimentos de Nadjai *et al.* (2006). Com a comparação

entre os resultados numéricos e analíticos, os autores concluíram que o modelo de análise simplificada proposto está em acordo com o modelo de elementos finitos em termos da temperatura crítica da mesa inferior das vigas e que o modelo proposto fornece previsões conservadoras, configurando uma vantagem de sua aplicação.

Wong, Burgess e Plank (2010b) realizaram simulações numéricas com o software ABAQUS com base em um teste de incêndio feito para investigar o comportamento de um piso misto com vigas alveolares com aberturas retangulares, protegidas com pintura intumescente. Os autores realizaram modificações no modelo analítico de dimensionamento de vigas alveolares, com base no modelo de barras, e obtiveram resultados que se ajustaram bem aos obtidos nos experimentos e no modelo numérico.

Fang e Yang (2011) analisaram, por meio de estudos numéricos com o software ABAQUS, a influência do peso dos dutos sobre as aberturas de vigas celulares em situação de incêndio. Com os resultados das análises, verificaram que o comportamento de vigas alveolares mistas em situação de incêndio é mais complexo que o esperado e que alguns fatores, que geralmente são ignorados no dimensionamento em temperatura ambiente, tais como a pequena carga local de peso de dutos, podem resultar em colapso das vigas celulares quando essas estiverem expostas a elevadas temperaturas. O que leva a concluir que o colapso de vigas celulares por flambagem, quando essas estão submetidas a altas temperaturas e é considerado o peso do duto sobre as aberturas, não pode ser estimado simplesmente pela aplicação de coeficientes de redução de rigidez com a temperatura, tal como consta em literatura técnica.

Nadjai *et al.* (2011) e Vassart *et al.* (2012) descreveram um ensaio de piso misto com vigas celulares e laje mista com fôrma de aço incorporada, realizado em escala real e submetido a incêndio natural. Os resultados provaram que devido à ação de membrana na laje, as vigas secundárias não são necessárias em situação de incêndio, não havendo também a necessidade de proteção térmica das mesmas, desde que as vigas principais sejam protegidas. O mesmo resultado foi obtido por Wong e Burgess (2013). Evidenciou-se ainda que a fôrma de aço se desprende do concreto e perde 94% de sua capacidade resistente aos 900 °C, comprovando a recomendação do EN 1993-1-2:2005 de desconsiderar sua contribuição em situação de incêndio.

Durif, Bouchaïr e Vassart (2013) adaptaram a formulação do método analítico de dimensionamento de vigas celulares mistas de eixo reto em temperatura ambiente para a situação de incêndio, considerando o efeito da elevação de temperatura nas características mecânicas do aço. Em seguida, estenderam a formulação para vigas celulares de eixo curvo e para vigas celulares de altura variável. Os autores fizeram uma comparação entre os valores obtidos com o modelo analítico e com o modelo numérico desenvolvido no software SAFIR e observaram que o modelo analítico apresenta resultados conservadores em relação ao modelo numérico, sobretudo quando o colapso se dá por flambagem do montante de alma, o que não impede que a formulação analítica seja utilizada para dimensionamento.

Wang, P., Ma e Wang, X. (2014) estudaram o comportamento de vigas casteladas sujeitas a grandes deformações através de um modelo de elementos finitos validado com dados de vigas de alma cheia submetidas a altas temperaturas e a grandes deformações. Estudou-se a influência da taxa de expansão da viga castelada em relação à que a originou; da dimensão, do arranjo e da forma das aberturas; e a rigidez da ligação da viga no comportamento à ação de catenária das vigas casteladas. O que se observou é que os fatores relacionados às aberturas da alma não têm influência no comportamento da viga à ação de catenária. Já a taxa de expansão e a rigidez da ligação das vigas apresentaram influência na temperatura em que ocorre colapso da viga.

Wang, P., Wang, X., Liu. (2014) fizeram análise térmica e termomecânica de vigas celulares submetidas a altas temperaturas, com o auxílio do software ABAQUS. Para obter a temperatura de flambagem do montante de alma de vigas celulares, propuseram adaptações à formulação da norma BS5950-1:2000 para barras comprimidas, tendo por base a analogia da FMAV com o modelo de biela.

Ellobody e Young (2015) fizeram uma análise numérica, com o software SAFIR, de vigas mistas de alma cheia e de vigas mistas casteladas submetidas a altas temperaturas, validadas com o teste de incêndio do edifício Mokrsko (WALD *et al.*, 2010). Foi feito um estudo em que se variou a taxa de carregamento, a resistência do aço e a curva de incêndio. Concluiu-se que a resistência do aço tem um efeito considerável sobre o comportamento de vigas mistas, conseqüentemente, no modo de colapso das mesmas, e

que a formulação apresentada pela norma europeia EN 1994-1-2:2005 é conservadora em relação aos resultados obtidos com o modelo de elementos finitos.

Wang *et al.* (2016) estudaram, através de um modelo numérico desenvolvido no software ABAQUS, a influência da proteção contra fogo em vigas celulares. Com base nos estudos de Bailey (2004), foi estudada a influência da presença de proteção térmica nas bordas das aberturas no TRRF, na temperatura crítica, no modo de flambagem e no desenvolvimento de tensões nas vigas. O que se observou é que o tempo de resistência ao fogo das vigas com a borda das aberturas protegidas aumenta linearmente com o aumento da espessura de revestimento contra fogo. Já no caso de bordas de aberturas sem proteção térmica, com o aumento da espessura de revestimento, o gradiente de temperatura da viga torna-se maior e, conseqüentemente, o incremento de tempo de resistência ao fogo diminui.

Nadjai *et al.* (2016) realizaram um ensaio experimental com vigas celulares mistas, com e sem proteção térmica, submetidas a altas temperaturas, segundo a curva de incêndio-padrão. Observou-se que a flambagem do montante de alma tem início quando a temperatura da viga atinge 600 °C. A essa temperatura o aço tem sua resistência degradada em 50 % e o módulo de elasticidade degradado em 80 %. O que leva a concluir que, como o módulo de elasticidade reduz mais rapidamente que a resistência do aço, a viga fica sujeita a instabilidade local e, portanto, o modo de falha predominante é a flambagem do montante de alma. Foi feito um modelo numérico que reproduziu bem os resultados do ensaio. Por fim, fez-se a modificação do modelo analítico proposto pelo Steel Construction Institute, SCI (2011), para o dimensionamento de vigas celulares, de forma a abarcar a redução das propriedades do aço em situação de incêndio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001. 14 p.

BAILEY, C. Indicative fire tests to investigate the behavior of cellular beams protected with intumescent coatings. **Fire Safety Journal**, v. 39, p. 689-709, 2004.

BAKE, S.; BAILEY, C. G. Performance of cellular steel beams at ambient and elevated temperatures. In: SEMC 2007: **The Third International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation**, 3., 2007. University of Cape Town, South Africa, 2007, p. 1268-1273.

BRITISH STANDARD. **BS5950-1**: Structural use of steelwork in building. UK, 2000.

CAMARGO, A. L. **Determinação da capacidade resistente à força cortante de perfis de alma senoidal em situação de incêndio**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DEMIRDJIAN, S. **Stability of Castellated Beam Webs**. Tese (Mestrado em Engenharia) - McGill University, Montreal, Canadá, 1999.

DURIF, S.; BOUCHAÏR, A. H.; VASSART, O. Validation of an analytical model for curved and tapered cellular beams at normal and fire conditions. **Periodica Polytechnica**, v. 57, n. 1, p.83-95, 2013.

ELLOBODY, E.; YOUNG, B. Nonlinear analysis of composite castellated beams with profiled steel sheeting exposed to different fire conditions. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 113, p. 247-260, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Design of steel structures: Part 1-2: General rules – Structural fire design**. Eurocode 3 – EN 1993-1-2. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Design of composite steel and concrete structures: Part 1-2: General rules – Structural fire design**. Eurocode 4 – EN 1994-1-2. 2005.

FANG, L.; YANG, M. Study of the composite cellular beam's behavior under HVCA ducts' weight while exposed to high temperature. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENGINEERING APPLICATION RESEARCH, 2011. **IETI Proceedings**, 2011. p. 312-315.

GRÜNBAUER, J. **What are castellated beams?** Disponível em: <<http://www.grunbauer.nl/eng/inhoud.htm>>. Acesso em: 12 out. 2016.

HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. Experiments on castellated steel beams. **Welding Research Supplement to the Welding Journal**, American Welding Society and the Welding Research Council. p. 329-342, 1973.

KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. Failure modes for castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 4, p. 295-315, 1984.

MENKULASI, F.; MOEN, C. D.; EATHERTON, M. R.; KURUPPUARACHCHI, D. Investigation of web post compression buckling limit state and stiffener requirements in castellated beams. **AISC Engineering Journal**, v. 54, p. 21-43, 2017.

NADJAI, A.; BAILEY, C. G.; BAKE, S. M.; TALAMONA, D.; ALLAM, A. Behaviour of composite floor cellular steel beams at elevated temperatures. In: **International Congress on Fire Safety in Tall Buildings**, Spain. p. 359-371, 2006.

NADJAI, A.; VASSART, O.; ALI, F.; TALAMONA, D.; ALLAM, A.; HAWES, M. Performance of cellular beam composite floor beams at elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 42, p. 489-497, 2007.

NADJAI, A.; BAILEY, C. G.; VASSART, O.; HAN, O.; ZHAO, B.; HAWES, M.; FRANSSEN, J. M.; SIMMS, I. Full-scale fire test on a composite floor slab incorporating long span cellular steel beams. **The Structural Engineer**, v. 89, n. 21, p. 18-25, 2011.

NADJAI, A.; PETROU, K.; HAN, S.; ALI, F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 579-588, 2016.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate Editora, 2001.

SILVEIRA, E. G. **Avaliação do comportamento estrutural de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação**. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. **Design of composite beams with large web openings**. SCI publication P355, 2011.

TOPRAC, A. A.; COOKE, B. R. An experimental investigation of open-web beams. **Weldings Research Council Bulletin**, New York. p. 1-10, 1959.

VASSART, O.; BAILEY, C. G.; HAWES, M.; NADJAI, A.; SIMMS, W. I.; ZHAO, B.; GERNAY, T.; FRANSSEN, J. M. Large-scale fire test of unprotected cellular beam acting in membrane action. **Structures and Buildings**, v. 165, p. 327-334, 2012.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

WALD, F.; PELOUCHOVÁ, J.; CHLOUBA, J.; STREJČEK, M. To shear resistance of castellated beam exposed to fire. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability and Ductility of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010.

WANG, P.; MA, N.; WANG, X. Numerical studies on large deflection behaviors of restrained castellated steel beams in a fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 100, p. 136-145, 2014.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M.; ZHANG, L. Web-post buckling of fully and partially protected cellular steel beams at elevated temperatures in a fire. **Thin-Walled Structures**, v. 98, p. 29-38, 2016.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behavior of composite cellular steel-concrete beams at elevated temperatures. **Steel Structures**, v. 9, p. 29-37, 2009.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability and Ductility of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010a.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Experimental and analytical investigations of the behaviour of protected composite floor beams with web openings in fire. **Structures in fire: Proceedings of the sixth international conference**. Michigan, EUA: DEStech Publications, 2010b. p. 366-373.

WONG, V. B.; BURGESS, I. W. The influence of tensile membrane action on fire-exposed composite concrete floor-steel beams with web-openings. **Procedia Engineering**, v. 62, p. 710-716, 2013.

ARTIGO 1 – DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE DA FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA POR CISALHAMENTO EM VIGAS CASTELADAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Larice Gomes Justino^a, José Carlos Lopes Ribeiro^a, Gustavo de Souza Veríssimo^a, Rita de Cássia Silva Sant’Anna Alvarenga^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus da UFV, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

*Manuscrito preparado para submissão a revista na área de Engenharias I

RESUMO

As vigas casteladas de aço apresentam aberturas sequenciais na alma que levam à modificação da distribuição de tensões no perfil em comparação a uma viga de alma cheia e, como consequência, a modos de colapsos próprios. Entre esses, tem-se a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Sabe-se ainda que, com o aumento da temperatura o modo de elasticidade do aço reduz mais rapidamente que sua resistência, o que faz com que o perfil fique mais propenso a falhar por instabilidade, levando a concluir que a FMAV pode ser o modo de colapso mais crítico em situação de incêndio. Assim sendo, foi proposto um modelo numérico para a análise desse modo de colapso em vigas casteladas de aço em situação de incêndio. O modelo foi validado com os resultados experimentais de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998), em temperatura ambiente, e ainda validou-se a hipótese de distribuição uniforme de temperatura ao longo do perfil. Para demonstrar a potencialidade do modelo numérico desenvolvido, elaborou-se ao final um estudo de caso, variando-se a esbeltez do montante de alma de diversas vigas casteladas, submetidas às temperaturas de 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C.

Palavras-chave: Vigas casteladas, Flambagem do montante de alma por cisalhamento, Incêndio, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Castellated steel beams have sequential openings in the web. It produces a modification of the stress distribution in comparison to a solid web beam. As a consequence, castellated beams have characteristic failure modes, one of these is the web-post buckling by shear. With the increase of the temperature, the elasticity modulus of the steel reduces faster than its strength, so the castellated beam becomes more susceptible to fail due to instability. Therefore, the web-post buckling by shear can be the most critical failure mode in fire. In this work, a numerical model was proposed for the analysis of this failure mode in castellated steel beams in fire. The model was validated with the experimental results of Vieira (2015) and Redwood and Demirdjian (1998) at ambient temperature. The hypothesis of uniform distribution of temperature along the profile in fire condition was validated. In order to demonstrate the potential of the developed numerical model, a case study was carried out on castellated beams with different slenderness of the web-post, submitted to 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C and 700 °C.

Keywords: Castellated Beams, Web-post buckling by shear, Fire, Finite Elements Method.

1. INTRODUÇÃO

As vigas com aberturas sequenciais na alma, denominadas vigas casteladas, são usualmente fabricadas a partir do corte longitudinal em ziguezague da alma de um perfil I (laminado ou soldado), com posterior deslocamento das partes de certo comprimento e soldagem, de forma a produzir uma viga de maior altura, com aberturas hexagonais na alma ou octogonais, quando entre as partes são inseridas chapas expansoras.

A presença de aberturas na alma de uma viga leva à modificação da distribuição de tensões na alma em relação ao que se observa em um perfil de alma cheia, reduzindo sua capacidade resistente sob determinadas condições de carregamento, podendo, inclusive, ocasionar fenômenos de instabilidade local, entre eles a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV), conforme Vieira (2015). Na Figura 1 mostra-se um detalhe de uma viga celular ensaiada por Nadjai *et al.* (2016), que sofreu colapso por FMAV.

Figura 1 – Flambagem do montante de alma por cisalhamento de uma viga celular mista.



Fonte: Nadjai *et al.* (2016).

O colapso por FMAV tem sido amplamente estudado, porém em sua maioria à temperatura ambiente. Assim, com a possibilidade do uso difundido de vigas casteladas e a crescente preocupação com a segurança das estruturas, faz-se indispensável o estudo do seu comportamento em situação de incêndio. Com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade do aço reduz mais rapidamente que a resistência, fazendo com que o perfil fique mais propenso ao colapso por instabilidade local (WONG, BURGESS e PLANK, 2010; WANG P., WANG X. e LIU, 2014 e NADJAI *et al.*, 2016).

Estudos realizados sobre FMAV em vigas alveolares (DELESQUES, 1968; DELESQUES, 1969; REDWOOD e DEMIRDJIAN, 1998; GHOLIZADEH, PIRMOZ e ATTARNEJAD, 2011; TSAVDARIDIS e D’MELLO, 2011; PANEDPOJAMAN, TREPCHATRI e LIMKATANYU, 2014; WANG P., WANG X. e LIU, 2014; WANG P., WANG X. e MA, 2014; POURBEHI e PIRMOZ, 2015; TSAVDARIDIS e GALIATSATOS, 2015; VIEIRA, 2015; WANG *et al.*, 2016) evidenciam que a determinação da força cisalhante resistente a esse modo de colapso independe do vão. Dessa forma, um modelo numérico que abranja apenas o montante de alma é adequado e suficiente para o estudo do fenômeno, como evidenciam Tsavdaridis e D’Mello (2011), Panedpojaman, Trepchatri e Limkatanyu (2014) e Vieira (2015).

Assim sendo, propõe-se neste trabalho um modelo numérico de montante de alma de vigas casteladas, compreendendo os padrões Litzka, Peiner e anglo-saxão, para simulação

do comportamento dessas vigas quanto à FMAV em diferentes temperaturas, gerando resultados que poderão ser utilizados como base para estudos mais aprofundados sobre o comportamento e dimensionamento das vigas casteladas em situação de incêndio.

2. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO EM TEMPERATURA AMBIENTE

2.1. Generalidades

Considerando vários estudos de modos de colapso locais em vigas alveolares (TSAVDARIDIS e D'MELLO, 2011; PANEDPOJAMAN, TREPCHATRI e LIMKATANYU, 2014; TSAVDARIDIS e GALIATSATOS, 2015; VIEIRA, 2015; MENKULASI *et al.*, 2017), foi desenvolvido um modelo numérico correspondente ao montante de alma de vigas casteladas, visando a análise da FMAV e a obtenção da força resistente ao cisalhamento. Esse modelo, desenvolvido no software ABAQUS, foi validado com base nos resultados de ensaios em temperatura ambiente realizados por Redwood e Demirdjian (1998) e por Vieira (2015).

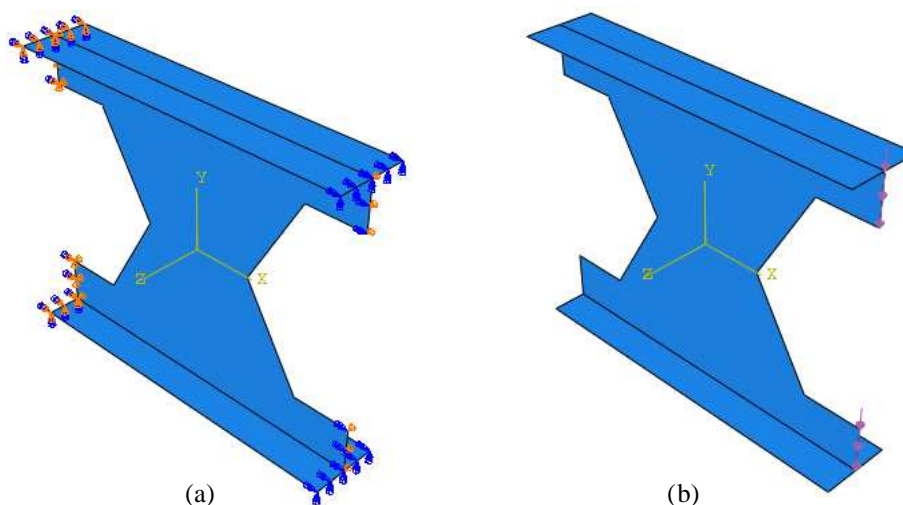
2.2. Características do modelo numérico

O modelo numérico de montante de alma (Figura 2.a) foi discretizado utilizando-se elementos de casca quadrilaterais de 8 nós com integração reduzida (S8R), com tamanho médio de 10 mm, definido através de um estudo de refinamento de malha.

O comportamento do aço foi considerado elastoplástico perfeito, onde, na fase elástica, admite-se o módulo de elasticidade igual a 200 GPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,3, e na fase plástica, a tensão é constante e igual à resistência ao escoamento do aço. Segundo Vieira (2015), o uso desse modelo constitutivo se justifica por sua simplicidade, rapidez na análise e bons resultados observados em diversos trabalhos numéricos com vigas casteladas.

Aplicou-se um carregamento distribuído ao longo da alma na seção à direita, conforme a Figura 2.b. As condições de contorno adotadas são apresentadas na Tabela 1, em que U é a translação e UR a rotação em torno dos eixos.

Figura 2 – Modelo geométrico e condições de contorno (a) e de aplicação de carregamento (b) do modelo numérico do montante de alma.



Fonte: A autora (2018).

Tabela 1 – Condições de contorno utilizadas no modelo numérico.

	U _x	U _y	U _z	UR _x	UR _y	UR _z
Alma direita	Livre	Livre	Fixo	Fixo	Livre	Livre
Alma esquerda	Fixo	Fixo	Fixo	Fixo	Livre	Livre
Mesa direita	Livre	Livre	Livre	Fixo	Fixo	Livre
Mesa esquerda	Fixo	Fixo	Livre	Fixo	Fixo	Livre

Fonte: A autora (2018).

A imperfeição inicial adotada foi de 1 % da altura da viga castelada, conforme a tolerância especificada para a imperfeição inicial do montante de alma pela ArcelorMittal (2013). Essas imperfeições foram aplicadas no modelo numérico como deslocamento máximo relativo ao primeiro modo de flambagem, que representa uma curvatura dupla ao longo do montante de alma.

Não foram aplicadas tensões residuais uma vez que, além de a distribuição das mesmas em vigas casteladas ser de difícil determinação em decorrência do processo de fabricação (NSEIR *et al.*, 2012), as formas de aplicações de tensões residuais propostas em literatura, como em Sonck (2013), não afetam de forma significativa colapsos locais, como a FMAV (TEIXEIRA, 2017).

2.3. Roteiro de análise

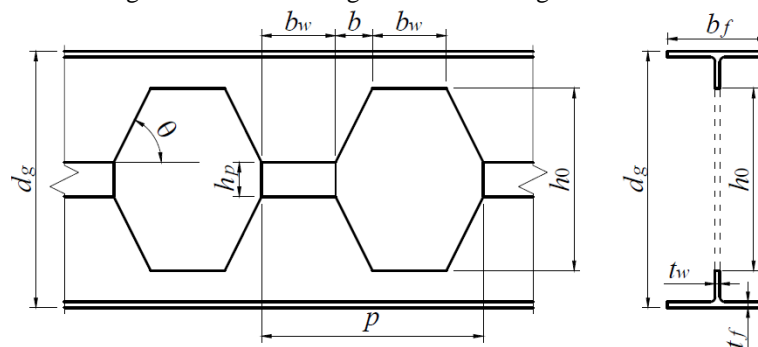
A análise foi feita em duas etapas, a primeira consiste em uma análise elástica de flambagem, do tipo *Buckle*, em que se aplica um carregamento unitário no modelo e

obtém-se autovalores associados a modos de flambagem, e a segunda etapa consiste em uma análise não linear pelo método de Riks, em que a imperfeição inicial é normalizada e aplicada ao modelo com base no primeiro modo de flambagem determinado na etapa anterior e o carregamento aplicado é igual ao autovalor obtido também na análise anterior. O resultado final do programa equivale à multiplicação do carregamento distribuído aplicado na alma pelo fator de proporcionalidade de carga (FPC), obtido no incremento de carga máxima.

2.4. Resultados

Para a validação do modelo numérico foram feitas análises numéricas das vigas casteladas do programa experimental de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998), cujos parâmetros geométricos (Figura 3) e o valor da resistência ao escoamento do aço da mesa ($f_{y,m}$) e da alma ($f_{y,a}$) são apresentadas na Tabela 2, para o programa experimental de Vieira (2015), e na Tabela 3, para o programa experimental de Redwood e Demirdjian (1998).

Figura 3 – Parâmetros geométricos de vigas casteladas.



Fonte: Vieira (2015).

Tabela 2 – Parâmetros geométricos e de resistência da análise experimental de Vieira (2015).

Modelo	d_g (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h_0 (mm)	b_w (mm)	p (mm)	h_p (mm)	<i>exc.</i> (mm)	$f_{y,m}$ (MPa)	$f_{y,a}$ (MPa)
A1	452,2	103,7	6,1	4,9	301	177,2	524,5	-	0,00	349	349
A2	450,9	101,8	6,1	5,1	298	176,5	524,8	-	0,00	341	345
B1	453,7	103,5	7,1	5,7	301	79,9	327,1	-	0,00	350	350
B2	451,1	101,4	6,1	5,1	302	76,8	327,4	-	0,00	350	350
B3	458,3	100,7	9,1	6,6	307	78,6	333,6	-	-6,70	365	365
B4	462,0	101,7	9,3	6,4	310	79,8	334	-	-9,40	413	413
B5	472,6	170,5	13,1	7,8	316	82,7	342,2	-	10,90	426	426
B6	472,9	171,3	12,5	8,0	317	82,3	342,2	-	8,00	426	426
C1	601,2	101,6	6,0	5,1	452	175,5	525,3	151	-0,60	350	350
C2	600,6	103,0	6,3	5,1	451	176,1	526,1	151	-3,20	350	350
C3	612,8	100,6	9,1	6,6	451	180,2	535,7	152	5,60	345	360
C4	610,6	101,7	9,2	6,5	457	178,7	534,8	147	-5,70	353	428
C5	623,6	171,5	12,4	8,0	466	183,0	551,4	146	7,70	416	449
C6	623,4	170,2	13,1	7,9	467	183,0	550,0	150	-8,40	416	449

Fonte: Adaptado de Vieira (2015).

Na Tabela 2, as vigas do tipo A são padrão Litzka, as vigas tipo B são padrão anglo-saxão e as vigas tipo C padrão Litzka com chapa expansora. A antepenúltima coluna (*exc.*) corresponde à excentricidade dos alvéolos em relação ao eixo da viga castelada.

Tabela 3 – Parâmetros geométricos e de resistência das vigas casteladas de Redwood e Demirdjian (1998).

Modelo	d_g (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h_0 (mm)	b_w (mm)	p (mm)	h_p (mm)	$f_{y,m}$ (MPa)	$f_{y,a}$ (MPa)
10-5a	380,5	66,9	4,59	3,56	266,2	77,8	308	-	345,6	352,9
10-5b	380,5	66,9	4,59	3,56	266,2	77,8 ⁽¹⁾	308 ⁽²⁾	-	345,6	352,9
10-6	380,5	66,9	4,59	3,56	266,2	77,8 ⁽¹⁾	308 ⁽²⁾	-	345,6	352,9
10-7	380,5	66,9	4,59	3,56	266,2	77,8	308	-	345,6	352,9

⁽¹⁾ Em Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011) e Pourbehi e Pirmoz (2015) esses valores são respectivamente 65 e 70 mm, logo ⁽²⁾ assume os valores 282,4 e 292,4.

Fonte: Adaptado de Redwood e Demirdjian (1998).

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4 e 5, nas quais se observa uma boa concordância entre os resultados obtidos numericamente ($V_{máx,num.}$) e os resultados experimentais ($V_{máx,exp.}$), demonstrando que o modelo de montante de alma representa de forma satisfatória a viga castelada correspondente.

Tabela 4 – Carga última do modelo numérico em relação aos resultados experimentais de Vieira (2015).

Modelo	$V_{máx,num.}$ (kN)	$V_{máx,exp.}$ (kN)	$V_{máx,num.}/V_{máx,exp.}$
A1	79,75	85,10	0,94
A2	85,01	91,00	0,93
B1	121,56	126,50	0,96
B2	97,89	89,80	1,09
B3	156,69	168,60	0,93
B4	162,29	161,50	1,00
B5	252,59	249,70	1,01
B6	257,86	270,40	0,95
C1	68,62	69,80	0,98
C2	69,17	72,70	0,95
C3	123,14	116,10	1,06
C4	127,47	128,50	0,99
C5	211,41	195,30	1,08
C6	195,88	194,70	1,01
		Média	0,99
		Desvio padrão	0,05
		Coeficiente de variação	5,42 %

Fonte: A autora (2018).

Tabela 5 – Carga última do modelo numérico em relação aos resultados experimentais de Redwood e Demirdjian (1998).

Modelo	$V_{máx,num.}$ (kN)	$V_{máx,exp.}$ (kN)	$V_{máx,num.}/V_{máx,exp.}$	$V_{máx,num.}$ (kN)*	$V_{máx,num.}^*/V_{máx,exp.}$
10-5a	45,00	46,35	0,97	45,00	0,97
10-5b	45,00	50,45	0,89	45,83	0,91
10-6	45,00	47,40	0,95	45,50	0,96
10-7	45,00	42,20	1,07	45,00	1,07
		Média	0,97		0,98
		Desvio padrão	0,07		0,07
		Coefficiente de variação	7,48 %		6,75 %

* Para os valores apresentados nos trabalhos de Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011) e Pourbehi e Pirmoz (2015)

Fonte: A autora (2018).

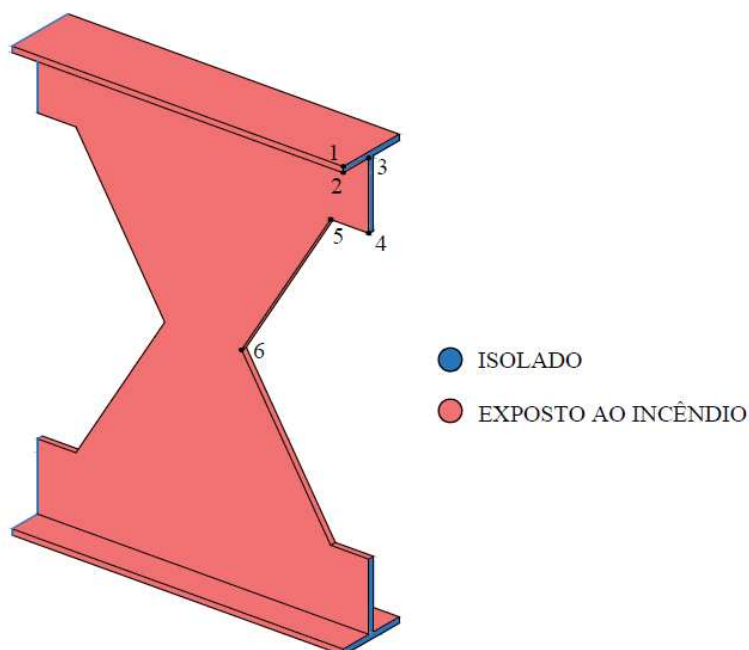
3. VALIDAÇÃO DA HIPÓTESE DE ISOTERMIA DOS PERFIS DE AÇO

Nas análises térmicas realizadas por Camargo *et al.* (2010; 2011) e por Vimonsatit, Tan e Ting (2007), verificou-se que a temperatura na alma dos perfis I analisados é praticamente homogênea em toda a sua altura, possibilitando que a análise mecânica posterior fosse realizada como se a alma estivesse submetida a condições isotérmicas.

Com o objetivo de justificar a adoção dessa distribuição homogênea de temperatura ao longo dos perfis analisados, foi realizada uma análise térmica com o auxílio do software ABAQUS, em montantes de alma de vigas W 310x21 e W 360x79, com castelação nos padrões Litzka (LT), anglo saxão (AS) e Peiner (PN). O modelo foi exposto ao incêndio nas quatro faces, e as laterais foram consideradas isoladas (Figura 4), dada a continuidade da viga castelada.

O modelo numérico foi discretizado utilizando-se elementos sólidos tetraédricos quadráticos de 10 nós, DC3D10, de dimensão média de 10 mm, pois, através de um estudo de refinamento de malha, observou-se que não há diferença significativa na temperatura nos pontos indicados na Figura 4 com o refinamento da malha para o perfil W 310x21 no padrão Litzka (Tabela 6) e que, para a dimensão média de 10 mm, há menor incidência de elementos distorcidos às custas de um tempo de análise regular. As propriedades térmicas do aço foram consideradas variáveis com a temperatura, o coeficiente de transferência de calor por convecção foi considerado igual a 25 W/m² °C e a emissividade resultante foi considerada, por simplicidade, igual 0,7; conforme a norma ABNT NBR 14323:2013.

Figura 4 – Condições de contorno do modelo de montante de alma para análise térmica.



Fonte: A autora (2018).

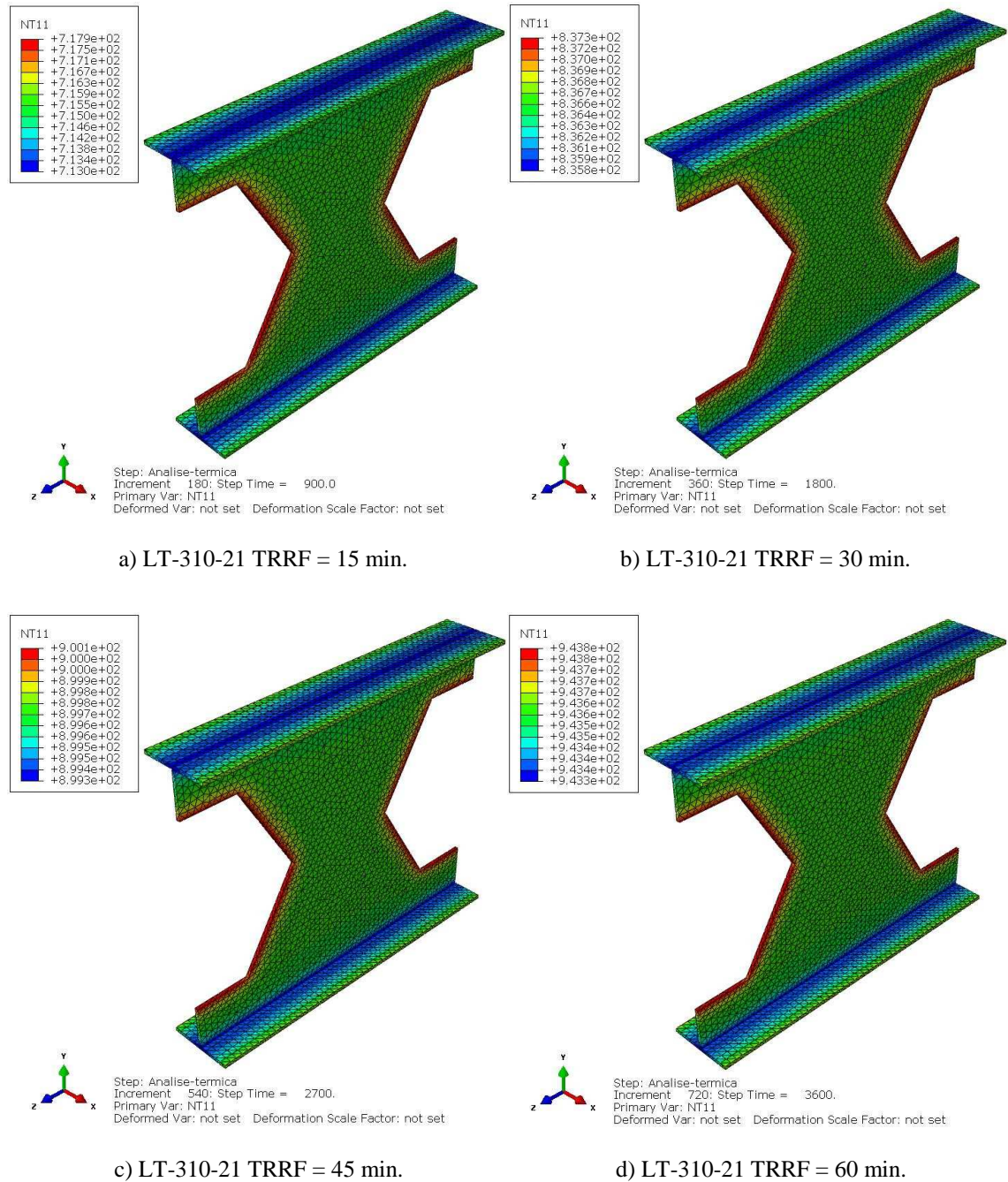
Tabela 6 – Estudo de convergência de malha para Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 15 min (Temperatura dos gases de 738,56 °C).

Dimensão média da malha (m)	Temperatura (°C)						Tempo de análise (s)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	
0,050	715,721	715,693	713,412	717,671	717,189	717,325	169
0,040	715,730	715,666	713,292	717,686	717,193	717,350	241
0,030	715,759	715,749	713,254	717,741	717,207	717,375	369
0,020	715,761	715,738	713,260	717,735	717,206	717,383	595
0,015	715,765	715,753	713,256	717,734	717,214	717,385	1044
0,010	715,761	715,758	713,267	717,730	717,211	717,386	2040
0,005	715,760	715,760	713,257	717,729	717,213	717,383	10841
0,002	715,759	715,759	713,259	717,729	717,213	717,382	187957

Fonte: A autora (2018).

Na análise realizada observou-se que a temperatura ao longo do perfil é praticamente homogênea, sobretudo nas vigas advindas do perfil W 310x21 (Figura 5). A Tabela 7 apresenta a temperatura máxima ($T_{máx}$) e a temperatura mínima ($T_{mín}$) nos modelos de montante de alma analisados, o que leva à conclusão de que não há uma variação grande de temperatura ao longo do perfil e que, a partir de determinados TRRF's, a temperatura das mesas e da alma passa a convergir.

Figura 5 – Resultados da análise térmica LT-310-21 aos 15, 30, 45 e 60 min de incêndio-padrão.



Fonte: A autora (2018).

Nas vigas provenientes do perfil W 360x79, observa-se uma menor homogeneidade na distribuição de temperatura, o que se deve à diferença do fator de massividade entre a mesa e a alma, uma vez que o perfil citado apresenta uma relação menor entre a altura do perfil e a largura das mesas, quando comparado ao perfil W 310x21. Ainda assim justifica-se adotar uma distribuição isotérmica, tendo em vista que, aos 15 minutos de incêndio-padrão as temperaturas já são próximas a 700 °C e a essa temperatura o aço tem

suas propriedades degradadas de forma expressiva, fazendo-se necessário o uso de material de revestimento contra fogo nas vigas casteladas e, nesses casos, a transferência de calor é retardada, propiciando uma distribuição mais uniforme de temperatura ao longo do perfil (WANG *et al.*, 2016).

Tabela 7 – Temperatura máxima e mínima nos modelos analisados.

Modelo	15 min.		30 min.		45 min.		60 min.	
	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	T_{\max} (°C)
LT-310-21	712,97	717,94	835,81	837,30	899,32	900,09	943,31	943,84
AS-310-21	712,97	717,95	835,81	837,30	899,32	900,09	943,31	943,84
PN-310-21	712,97	717,94	835,81	837,30	899,32	900,09	943,31	943,84
LT-360-79	620,11	695,06	795,02	831,89	892,75	898,27	939,22	942,67
AS-360-79	620,17	695,44	795,03	831,94	892,75	898,27	939,22	942,67
PN-360-79	620,13	695,11	795,02	831,89	892,75	898,27	939,22	942,67

Fonte: A autora (2018).

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Generalidades

O estudo de caso realizado tem por base a metodologia adotada por Vimonsatit, Tan e Ting (2007) e Camargo *et al.* (2010; 2011), em que, a partir de modelos validados em temperatura ambiente, faz-se a modificação das propriedades do aço, admitindo-se distribuição uniforme de temperatura ao longo do perfil analisado, e então faz-se a análise mecânica.

4.2. Seleção dos perfis de aço

A partir da constatação de que vigas casteladas, com taxa de expansão (k) de 1,5, obtidas a partir de perfis brasileiros não possuem um espectro de esbeltez que condicione à plastificação e à flambagem elástica, seguiu-se a mesma metodologia adotada por Vieira (2015), onde modificou-se a espessura da alma (t_w) para se obter diversas esbeltezes, mantendo constante a relação entre as espessuras da mesa e da alma (t_f/t_w).

Para tanto, foram analisados montantes de alma castelados nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner, com $k = 1,5$ (GALAMBOS, HOSAIN e SPEIRS, 1975), obtidos a partir

dos perfis W 310x21 e W 360x79, mantendo-se a relação t_f/t_w igual a 1,51, que é a média para os perfis de viga brasileiros. As propriedades geométricas fixas dos modelos analisados são apresentadas na Tabela 8 e os parâmetros variáveis, nas Tabelas 9, 10 e 11.

Tabela 8 – Propriedades geométricas dos perfis analisados.

Modelo	Padrão	Perfil original	d_g (mm)	b_f (mm)	h_0 (mm)	b_w (mm)	p (mm)	b (mm)	h_p (mm)
LT-310-21	Litzka	W 310x21	454,5	101	303	174,95	524,86	87,48	0
AS-310-21	Anglo-saxão	W 310x21	454,5	101	303	75,75	327,24	87,87	0
PN-310-21	Peiner	W 310x21	454,5	101	303	151,5	454,5	75,75	0
LT-360-79	Litzka	W 360x79	531	205	354	204,4	613,2	102,2	0
AS-360-79	Anglo-saxão	W 360x79	531	205	354	88,5	382,32	102,66	0
PN-360-79	Peiner	W 360x79	531	205	354	177	531	88,5	0

Fonte: A autora (2018).

Tabela 9 – Parâmetros variáveis para padrão Litzka.

λ	LT-310-21		LT-360-79	
	t_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
400	2,29	1,52	2,67	1,77
350	2,61	1,73	3,05	2,02
300	3,05	2,02	3,56	2,36
250	3,66	2,42	4,28	2,83
200	4,58	3,03	5,35	3,54
175	5,23	3,46	6,11	4,05
150	6,10	4,04	7,13	4,72
125	7,32	4,85	8,55	5,66
100	9,15	6,06	10,69	7,08
80	11,44	7,58	13,36	8,85
70	13,07	8,66	15,27	10,11
60	15,25	10,10	17,82	11,80
50	18,30	12,12	21,38	14,16
40	22,88	15,15	26,73	17,70
30	30,50	20,20	35,64	23,60

Fonte: A autora (2018).

As esbeltezes (λ) elencadas foram selecionadas com base nos valores de λ_r e λ_p determinados por Vieira (2015), respectivamente como os limites entre flambagem elástica e inelástica e flambagem inelástica e plastificação, de forma a se computar os diferentes modos de colapso.

Tabela 10 – Parâmetros variáveis para padrão anglo-saxão.

λ	AS-310-21		AS-360-79	
	t_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
400	2,04	1,35	2,39	1,58
350	2,33	1,55	2,73	1,81
300	2,72	1,80	3,18	2,11
250	3,27	2,16	3,82	2,53
200	4,08	2,70	4,77	3,16
175	4,67	3,09	5,45	3,61
150	5,45	3,61	6,36	4,21
125	6,53	4,33	7,63	5,06
100	8,17	5,41	9,54	6,32
75	10,89	7,21	12,72	8,43
60	13,61	9,02	15,91	10,53
50	16,34	10,82	19,09	12,64
30	27,23	18,03	31,81	21,07
25	32,67	21,64	38,17	25,28
20	40,84	27,05	47,72	31,60

Fonte: A autora (2018).

Tabela 11 – Parâmetros variáveis para padrão Peiner.

λ	PN-310-21		PN-360-79	
	t_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
400	2,22	1,47	2,59	1,71
350	2,53	1,68	2,96	1,96
300	2,95	1,96	3,45	2,29
250	3,54	2,35	4,14	2,74
200	4,43	2,93	5,18	3,43
175	5,06	3,35	5,92	3,92
150	5,91	3,91	6,90	4,57
125	7,09	4,69	8,28	5,48
100	8,86	5,87	10,35	6,86
80	11,08	7,33	12,94	8,57
70	12,66	8,38	14,79	9,79
60	14,77	9,78	17,25	11,43
50	17,72	11,74	20,70	13,71
40	22,15	14,67	25,88	17,14
30	29,53	19,56	34,50	22,85

Fonte: A autora (2018).

4.3. Temperaturas de análise

As temperaturas propostas para o estudo foram 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C. A seleção desses valores deve-se aos seguintes fatos. A 300 °C a degradação do módulo

de elasticidade do aço já se iniciou, a 400 °C tem-se o início da degradação da resistência do aço, a 600 °C teve-se o início da FMAV nas vigas celulares estudadas por Nadjai *et al.* (2016) e a 700 °C o aço apresenta degradação considerável das suas propriedades.

Utilizou-se em situação de incêndio o mesmo modelo constitutivo usado na validação do modelo em temperatura ambiente, porém com os valores do módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento reduzidos pelos coeficientes $k_{E,\theta}$ e $k_{y,\theta}$, respectivamente, conforme a ABNT NBR 14323:2013 e de acordo com a temperatura em estudo (Tabela 12).

Tabela 12 – Propriedade do aço estrutural nas temperaturas de análise.

Temperatura (θ)	$k_{y,\theta}$	$f_{y,\theta}$ (MPa)	$k_{E,\theta}$	$E_{a,\theta}$ (GPa)
20 °C	1,00	345,00	1,00	200
300 °C	1,00	345,00	0,80	160
400 °C	1,00	345,00	0,70	140
600 °C	0,47	162,15	0,31	62
700 °C	0,23	79,35	0,13	26

Fonte: A autora (2018).

4.4. Roteiro de análise

Para cada modelo foram obtidas a força cortante crítica de flambagem elástica (V_{cr}), a força cortante resistente (V') e a força cortante de plastificação (V_p). A força cortante crítica de flambagem elástica foi obtida a partir do autovalor correspondente ao primeiro modo de flambagem, através da análise de *Buckle*. A força cortante resistente foi obtida por uma análise não linear material e geométrica, com a aplicação da carga crítica pelo método de Riks, considerando-se uma imperfeição inicial de 1% da altura do perfil castelado. A força cortante de plastificação foi obtida pelo mesmo método de V' , porém, impedindo a alma de se deslocar fora do plano ($U_z = 0$).

Vieira (2015) obteve a força cortante de plastificação apenas desconsiderando a imperfeição inicial. Porém, dessa forma, o modelo se torna muito sensível às peculiaridades da malha de elementos finitos. As análises realizadas neste trabalho indicaram que admitir a imperfeição inicial e impedir a alma de deslocar fora de seu plano (impedindo fisicamente a flambagem) leva a resultados melhores.

4.5. Resultados

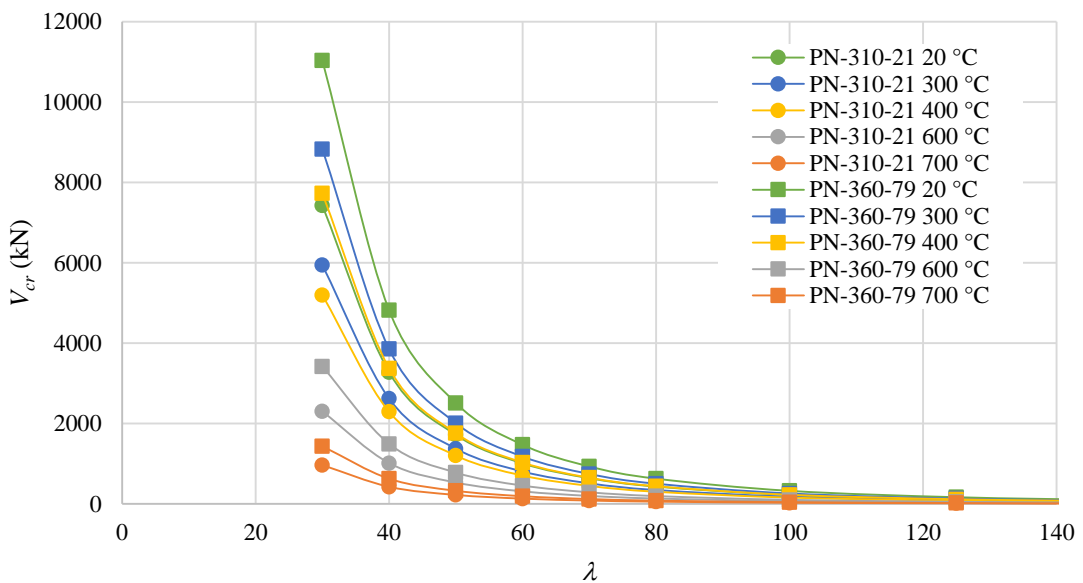
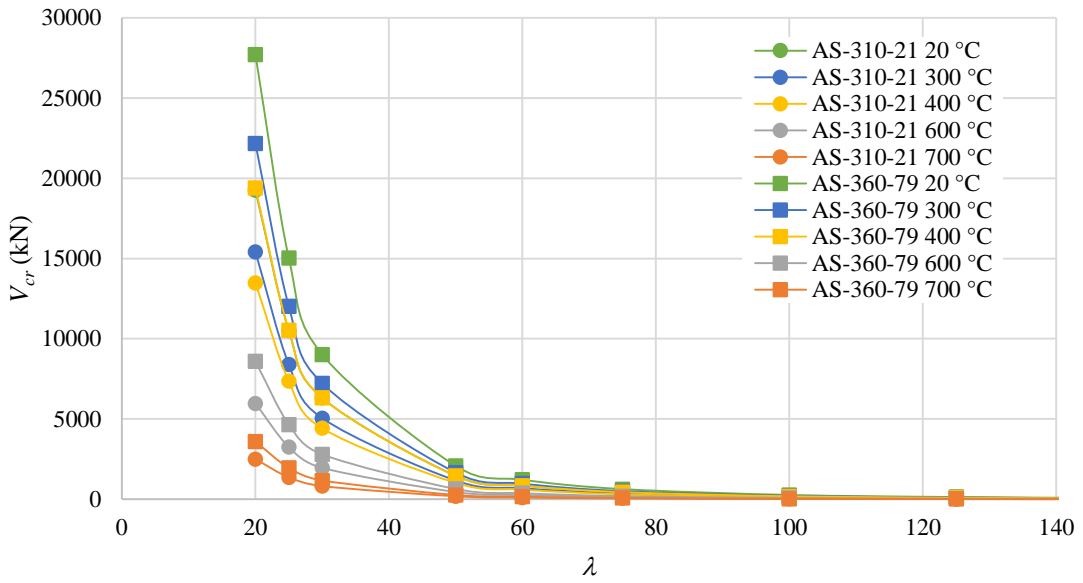
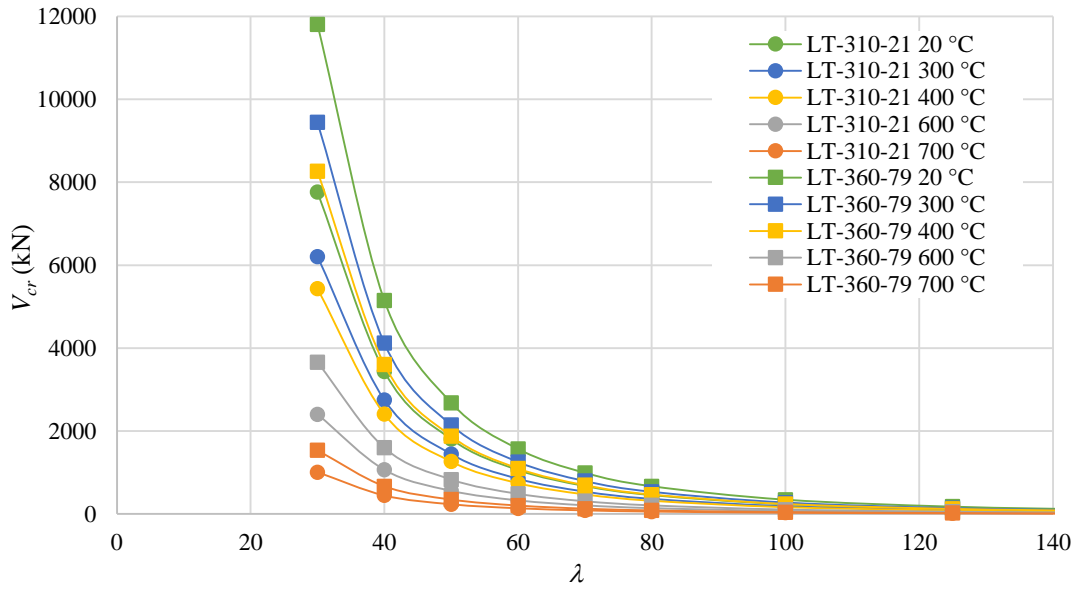
Nas Figuras 6, 7 e 8, apresentam-se os resultados para a força cortante crítica de flambagem elástica (V_{cr}), força cortante de plastificação (V_p) e força cortante resistente (V') obtidos a partir da variação de parâmetros de rigidez e resistência conforme a temperatura de análise para os modelos analisados. Nota-se que a força cortante crítica de flambagem elástica varia, num mesmo modelo, a cada temperatura, pois esta depende do módulo de elasticidade que, por sua vez, varia em todas as temperaturas de análise, como pode ser observado na Tabela 12.

O valor da força cortante de plastificação é o mesmo para as temperaturas de 20 °C, 300 °C e 400 °C em um mesmo modelo, uma vez que a sua determinação depende da tensão de escoamento do aço, que se diferencia do valor em temperatura ambiente apenas para temperaturas superiores a 400 °C.

Observando-se as Figuras 6, 7 e 8, nota-se a similaridade de comportamento de vigas padrão Litzka e Peiner e a superioridade do padrão anglo-saxão, no tocante à resistência à FMAV.

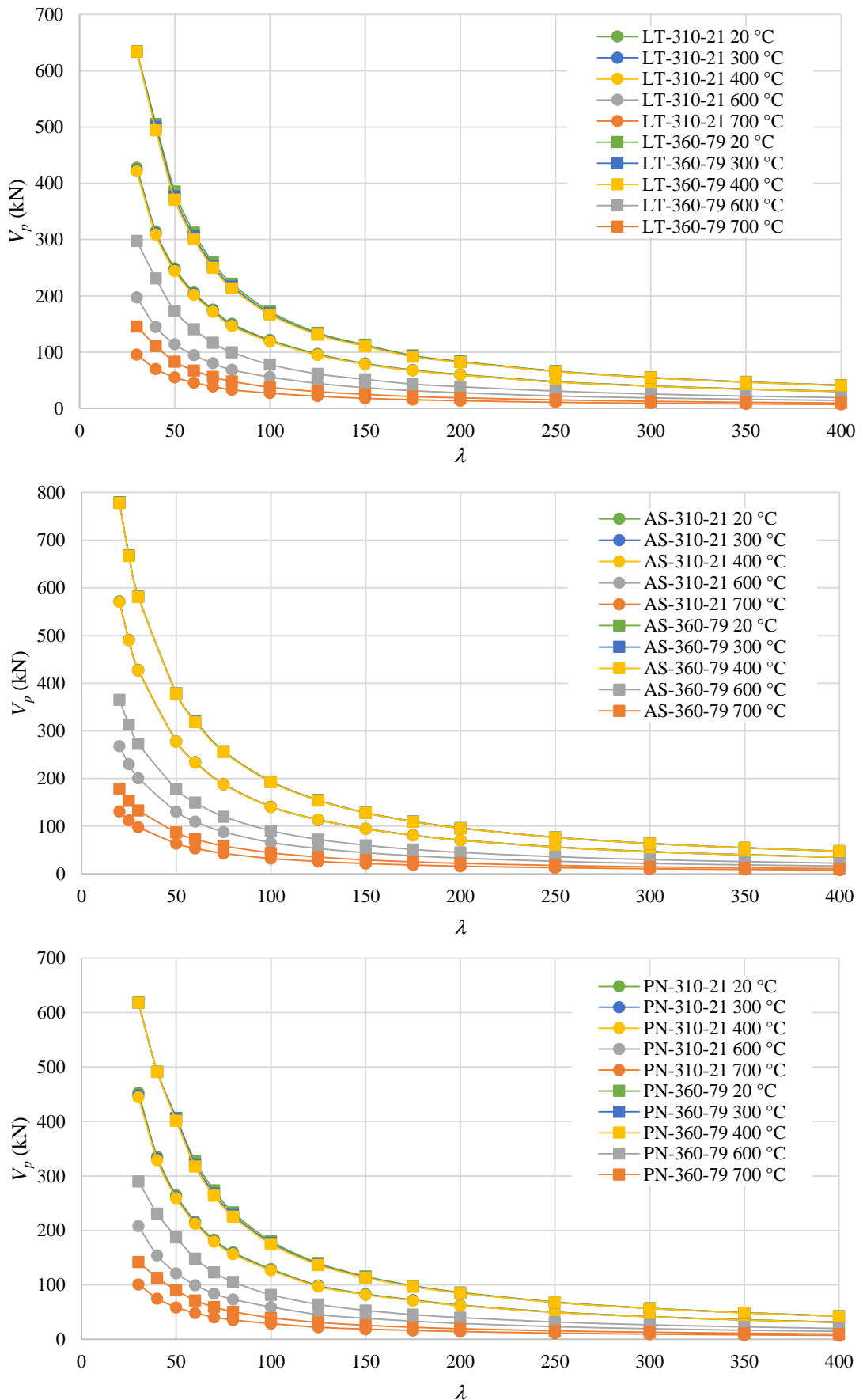
Na Figura 8, observa-se que nos trechos iniciais há sobreposição das curvas de 20 °C, 300 °C e 400 °C. Isso representa que, para esses valores de esbeltez, ocorre plastificação e, a partir da esbeltez em que há a separação das curvas, tem-se o início da flambagem inelástica. Essa afirmação pode ser melhor observada na Figura 9, em que, a título de exemplo, são apresentadas as curvas de V_p , V_{cr} e V' para o modelo de montante de alma LT-310-21, a 20 °C e a 600 °C. No trecho em que a curva V_p coincide com a curva V' , ocorre plastificação. No trecho a partir do encontro das curvas V_{cr} e V' , ocorre flambagem elástica e, entre esses trechos ocorre flambagem inelástica.

Figura 6 – Força cortante crítica (V_{cr}).



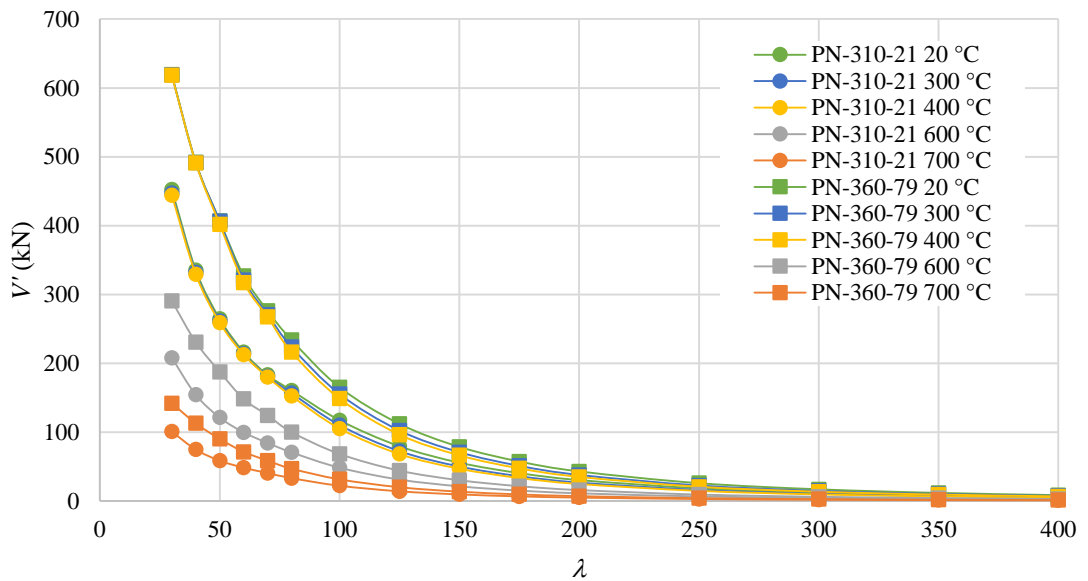
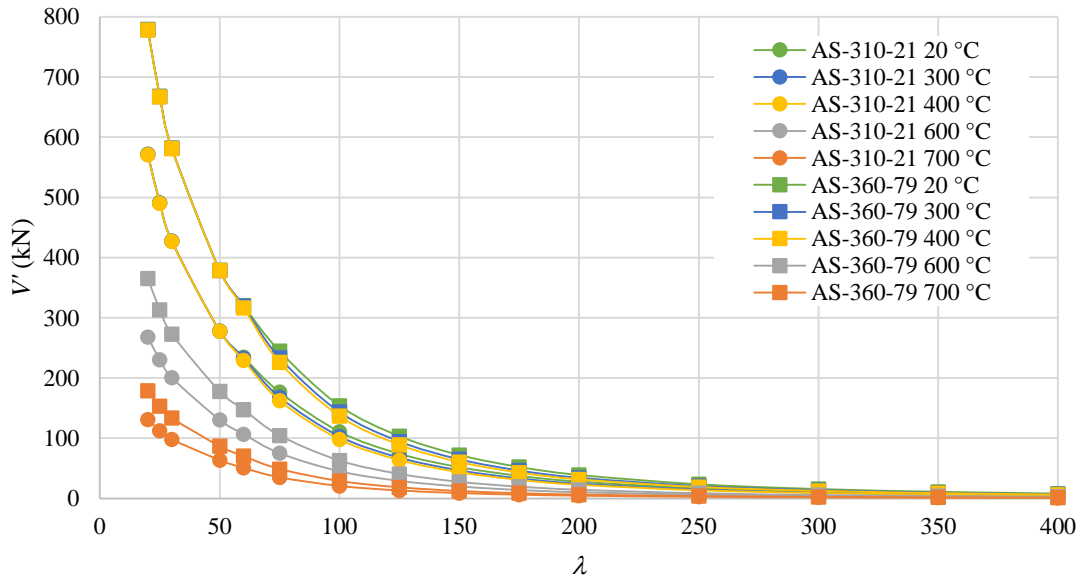
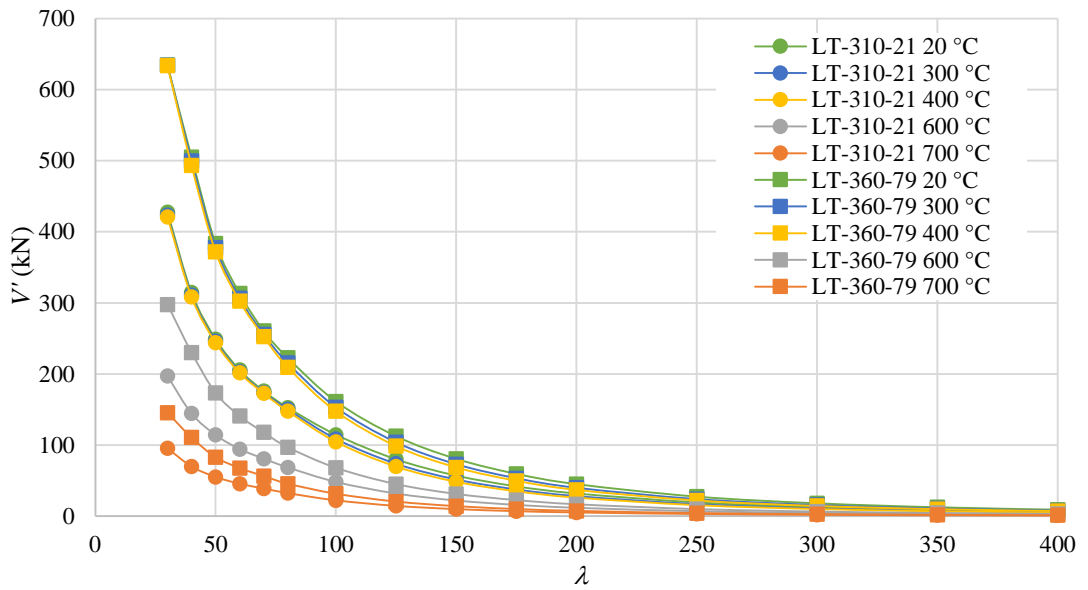
Fonte: A autora (2018).

Figura 7 – Força cortante de plastificação (V_p).



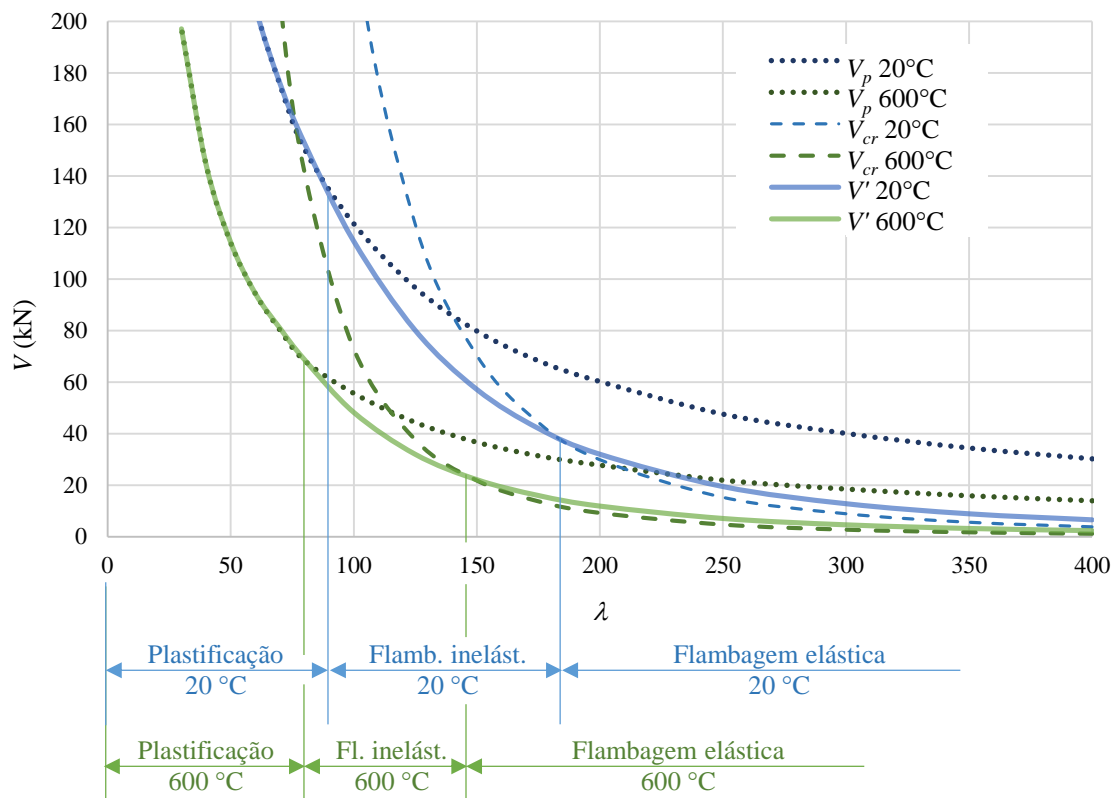
Fonte: A autora (2018).

Figura 8 – Força cortante resistente (V').



Fonte: A autora (2018).

Figura 9 – Força cortante no perfil LT-310-21 a 20 °C e a 600 °C.



Fonte: A autora (2018).

Na Figura 9 é possível observar que, com o aumento da temperatura, além de o perfil resistir a uma força menor que em temperatura ambiente, também está propenso a ter um modo de colapso diferente, como afirmam Wong, Burgess e Plank (2010), Wang P., Wang X. e Liu (2014) e Nadjai *et al.* (2016), pois os valores de esbeltez-limite (λ_r e λ_p) variam com o aumento da temperatura.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um modelo numérico desenvolvido no software ABAQUS para a análise do montante de alma de vigas casteladas de aço sujeitas à FMAV. A comparação entre resultados numéricos e experimentais comprovou a eficácia do modelo, apresentando um desvio médio máximo de 3% e um coeficiente de variação máximo de 7,48% em relação às vigas casteladas do programa experimental de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998).

O modelo numérico elaborado foi capaz de simular o comportamento de vigas casteladas em diferentes temperaturas, partindo da hipótese de distribuição homogênea de temperatura ao longo do perfil. O modelo numérico demonstrou ser capaz de representar os modos de colapso por flambagem e por plastificação, em função da esbeltez do perfil de aço analisado.

Com o estudo de caso realizado foi possível observar que, com o aumento da temperatura, pode ocorrer, além da redução da resistência do perfil, um modo de colapso diferente daquele que ocorre em temperatura ambiente, como afirmam Wong, Burgess e Plank (2010), Wang P., Wang X. e Liu (2014) e Nadjai *et al.* (2016).

Esse trabalho fornece também diretrizes que, de forma satisfatória, poderão ser usadas como base para estudos mais aprofundados sobre o comportamento e dimensionamento de vigas casteladas de aço sujeitas à FMAV em situação de incêndio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal de Viçosa pelo apoio para a realização e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCELORMITTAL. **Angelina™ beams** - A new generation of castellated beams. 1 ed. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

CAMARGO, A. L.; FAKURY, R. H.; CALDAS, R. B.; SILVA, A. L. R. C. Sobre a capacidade resistente à força cortante de painéis de alma de seções I em situação de incêndio considerando o efeito do campo de tração. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 6919-6930, 2010.

CAMARGO, A. L.; FAKURY, R. H.; CALDAS, R. B.; SILVA, A. L. R. C. Capacidade resistente à força cortante de perfis de alma senoidal em temperatura elevada. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 8, p. 38-52, 2011.

DELESQUES, R. Stabilité des montants de poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 3, p.26-33, 1968.

DELESQUES, R. Le calcul des poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 4, p. 41-51, 1969.

GALAMBOS, A. R.; HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. Optimum expansion ratio of castellated steel beams. **Engineering Optimization**, v. 1, p. 213-225, 1975.

GHOLIZADEH, S.; PIRMOZ, A.; ATTARNEJAD, R. Assesment of load carrying capacity of castellated steel beams by neural networks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 770-779, 2011.

MENKULASI, F.; MOEN, C. D.; EATHERTON, M. R.; KURUPPUARACHCHI, D. Investigation of web post compression buckling limit state and stiffener requirements in castellated beams. **AISC Engineering Journal**, v. 54, p. 21-43, 2017.

NADJAI, A.; PETROU, K.; HAN, S.; ALI, F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 579-588, 2016.

NSEIR, J.; LO, M.; SONCK, D.; SOMJA, H.; VASSART, O.; BOISSONNADE, N. Lateral Torsional Buckling of Cellular Steel Beams. In: **Proceedings of the Annual Stability Conference** - Structural Stability Research Council. Grapevine, Texas, 2012.

PANEDPOJAMAN, P.; TREPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 76, p. 92-104, 2014.

POURBEHI, P.; PIRMOZ, A. Shear response of castellated steel beams. **International Journal of Steel Structures**, v. 15, p. 389-399, 2015.

REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 1202-1207, 1998.

SONCK, D. **Global Buckling of Castellated and Cellular Steel Beams and Columns**. PhD Thesis - Department of Structural Engineering - Ghent University, Belgium, 2013.

TEIXEIRA, F. B. **Estudo numérico do comportamento estrutural de perfis alveolares de aço**. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. Web buckling study of the behavior and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 1605-1620, 2011.

TSAVDARIDIS, K. D.; GALIATSATOS, G. Assessment of cellular beams with transverse stiffeners and closely spaced web openings. **Thin-Walled Structures**, v. 94, p. 636-650, 2015.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

VIMONSATIT, V.; TAN, K. H.; TING, S. K. Shear strength of plate girder web panel at elevated temperature. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 63, p. 1442-1451, 2007.

WANG, P.; GUO, K.; LIU, M.; ZHANG, L. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 173-184, 2016.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WANG, P.; WANG, X.; MA, N. Vertical shear buckling of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings. **Engineering Structures**, v. 75, p. 315-326, 2014.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability And Ductility Of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010.

ARTIGO 2 – MODELO SEMIEMPÍRICO PARA OBTENÇÃO DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE À FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA POR CISALHAMENTO EM VIGAS CASTELADAS DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Larice Gomes Justino^a, José Carlos Lopes Ribeiro^a, Gustavo de Souza Veríssimo^a, Rita de Cássia Silva Sant’Anna Alvarenga^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus da UFV, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

*Manuscrito preparado para submissão a revista na área de Engenharias I

RESUMO

As formulações existentes para determinação da força cortante resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV) de vigas casteladas de aço, em sua maioria, dependem de muitas variáveis, não são aplicáveis à situação de incêndio ou não tem uma abordagem normativa. Com o objetivo de se obter uma formulação mais simples e prática, aplicável também à situação de incêndio, foi proposta, nesse trabalho, uma formulação semiempírica com base em resultados numéricos de modelos validados, tendo em vista a analogia entre o modelo de biela e a diagonal comprimida de um montante de alma sujeito à FMAV. Esse modelo semiempírico se baseia na formulação para a obtenção da capacidade resistente de barras submetidas à força axial de compressão presente na norma ABNT NBR 14323:2013 e é aplicável à vigas casteladas nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner.

Palavras-chave: Modelo semiempírico, Vigas casteladas, Incêndio, Flambagem do montante de alma por cisalhamento.

ABSTRACT

Most of existing formulations for determination of shear strength due to web-post buckling by shear (WPBS) in castellated steel beams depend on many variables, are not applicable to fire situation or do not have a normative approach. In order to provide a simpler and more practical formulation, also applicable to the fire situation, this work presents a semi-empirical formulation based on numerical results of validated models, considering the analogy between the strut model and the compressed diagonal of a web-post subject to WPBS. This semi-empirical model is based on the formulation of ABNT NBR 14323: 2013 to obtain the resistance of compressed members and it is applicable to Litzka, anglo-saxon and Peiner type castellated beams.

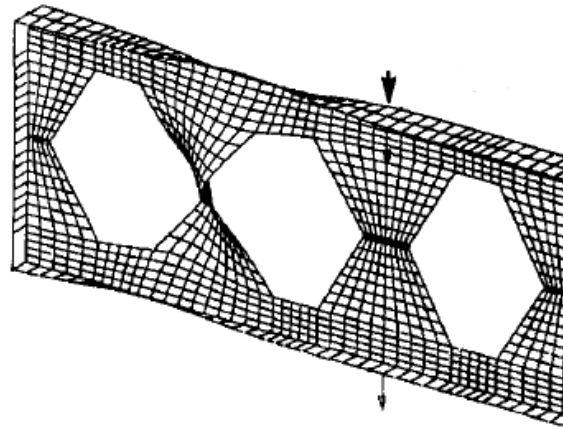
Keywords: Semi-empirical model, Castellated Beams, Fire, Web-post buckling by shear.

1. INTRODUÇÃO

As vigas casteladas são formadas a partir de perfis laminados ou soldados cortados longitudinalmente ao longo da alma, deslocados em seu comprimento e soldados gerando aberturas na alma com forma hexagonal ou octogonal, quando entre as partes é inserida uma chapa expansora. Essas vigas têm como vantagem a possibilidade da integração das instalações prediais com a estrutura, reduzindo-se assim a altura da edificação e, como consequência do aumento da inércia sem alteração significativa do peso, são apropriadas para grandes vãos e para situações em que a deformação condiciona o dimensionamento.

Observa-se que a presença de aberturas na alma leva à modificação da distribuição de tensões na viga em relação ao perfil de alma cheia, propiciando modos de colapso próprios das vigas casteladas, como a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV). Na Figura 1 apresenta-se a FMAV em uma viga castelada de aço obtida por meio de simulação numérica.

Figura 1 – FMAV em viga castelada de aço obtida por simulação numérica.

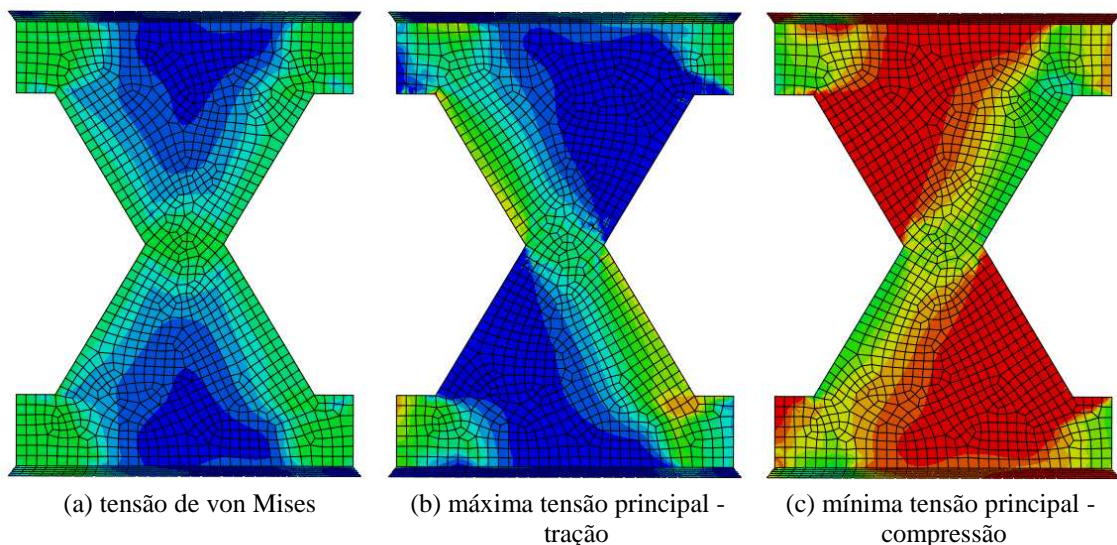


Fonte: Adaptado de Redwood e Demirdjian (1998).

A FMAV é o modo de colapso mais crítico em vigas casteladas de alma esbelta e em situação de incêndio, quando a rigidez do aço sofre uma redução mais expressiva que sua resistência, favorecendo modos de colapso por instabilidade.

Esse modo de colapso compreende a formação de uma diagonal comprimida e uma diagonal tracionada no montante de alma, como pode ser observado na Figura 2. Entende-se a diagonal comprimida como uma barra submetida à compressão axial, o que compreende a analogia ao modelo de biela adotada por Lawson *et al.* (2006); Tsavdaridis e D’Mello (2011); Wang P., Wang X. e Liu (2014) e Panedpojaman, Trepchatri e Limkatanyu (2014) para vigas celulares. Essa analogia também é aplicada neste trabalho às vigas casteladas.

Figura 2 – Distribuição de tensões no montante de alma em vigas casteladas.



Fonte: A autora (2018).

A aplicação da analogia ao modelo de biela, em detrimento de outros métodos existentes para a obtenção da força cortante resistente à FMAV de vigas casteladas, se justifica pelo número expressivo de variáveis presentes em outras formulações, como em Delesques (1968; 1969), pela dificuldade de determinação de índices de esbeltez-limite, como em Vieira (2015) e por um maior desenvolvimento de formulações a partir dessa analogia (LAWSON *et al.*, 2006; TSAVDARIDIS e D’MELLO, 2011; PANEDPOJAMAN, TREPCHATRI e LIMKATANYU, 2014; WANG P., WANG X. e LIU, 2014; WANG P., WANG X. e MA, 2014), estando ainda consonante às formulações presentes na norma ABNT NBR 14323:2013.

Assim sendo, propõe-se neste trabalho um modelo semiempírico para obtenção da força cortante resistente à FMAV de vigas casteladas nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner em situação de incêndio, constituído a partir de resultados numéricos de modelos validados.

2. DIMENSIONAMENTO À FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA POR CISALHAMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

2.1. Formulação para barra comprimida conforme ABNT NBR 14323:2013

Dada a analogia da flambagem do montante de alma por cisalhamento ao modelo de biela, pode-se interpretar a diagonal comprimida do montante de alma como uma barra submetida à força axial de compressão. Portanto, esse modo de colapso pode ser equacionado de forma semelhante ao método presente na norma ABNT NBR 14323:2013 para dimensionamento de barras comprimidas.

A norma ABNT NBR 14323:2013 apresenta a formulação a seguir para o cálculo da força axial resistente de cálculo (N_{fi}) de uma barra de aço submetida à compressão axial considerando o estado-limite último de instabilidade da barra como um todo:

$$N_{fi} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (1)$$

onde: χ_{fi} é o fator de redução associado à compressão em situação de incêndio (Equação 2);

$k_{y,\theta}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço do perfil em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente (Tabela 1 da norma ABNT NBR 14323:2013);

A_g é a área bruta da seção transversal submetida à compressão;

f_y é a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}} \quad (2)$$

em que:

$$\varphi_{0,fi} = 0,5(1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) \quad (3)$$

e:

$$\alpha = 0,022 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (4)$$

sendo: E o módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente;

f_y a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente;

$\lambda_{0,fi}$ o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio (Equação 5):

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} \quad (5)$$

onde λ_0 é o índice de esbeltez reduzido à temperatura ambiente, calculado conforme a ABNT NBR 8800:2008.

2.2. Modelagem numérica

Visando à adaptação das equações presentes na norma ABNT NBR 14323:2013 para cálculo da FMAV, foi realizado um estudo de variação de parâmetros, com o auxílio do

software ABAQUS, considerando-se várias esbeltezes de alma e temperaturas de 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C, adotando-se a isotermita da alma.

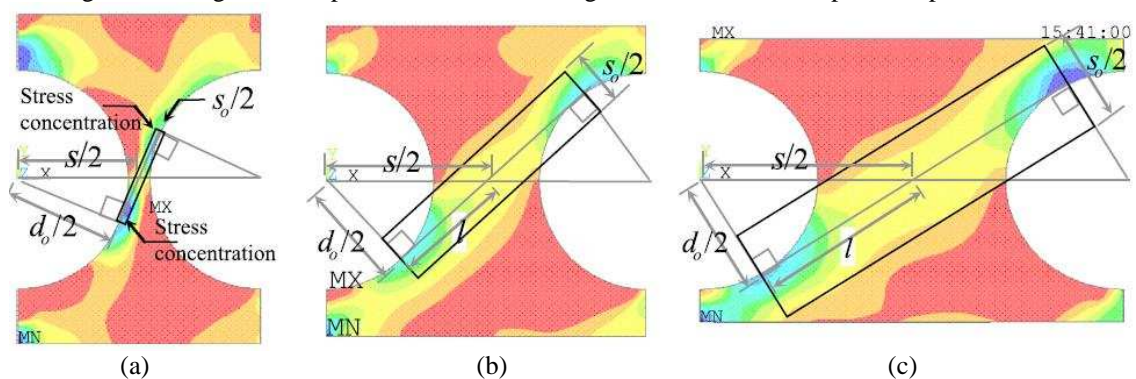
Os montantes de alma analisados compreendem os padrões de castelação Litzka (LT), anglo-saxão (AS) e Peiner (PN) e foram obtidos a partir dos perfis de aço W 310x21 e W 360x79. Ao variar a esbelteza de alma dos mesmos, manteve-se a taxa de expansão das vigas casteladas em 1,5 (GALAMBOS, HOSAIN e SPEIRS, 1975) e a relação entre a espessura da mesa (t_f) e a espessura da alma (t_w) em 1,51.

As características do modelo foram as mesmas utilizadas no Artigo 1, que foram validadas com base nos experimentos de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998). Desse estudo obtiveram-se os valores de força cortante crítica de flambagem elástica (V_{cr}), força cortante de plastificação (V_p) e força cortante resistente (V').

2.3. Proposição de um modelo semiempírico

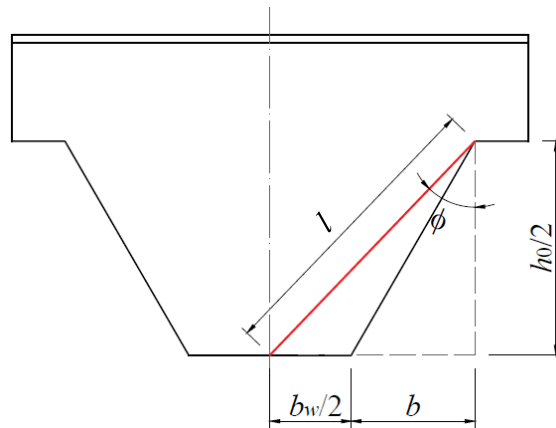
Panedpojaman, Trepchatri e Limkatanyu (2014) sugerem que o comprimento de uma barra equivalente (l) de uma viga alveolar sujeita à flambagem do montante de alma por cisalhamento seja calculado como sendo a metade do comprimento entre os pontos em que ocorrem os valores máximos de tensão de compressão, como pode ser observado na Figura 3. O mesmo foi adotado no presente trabalho e, tendo em vista que há máxima concentração de tensão de compressão nos cantos das aberturas em vigas casteladas, o comprimento de flambagem (l) foi calculado como apresentado na Figura 4 e na Equação (6).

Figura 3 – Largura e comprimento da biela em vigas celulares obtidas a partir do perfil IPE 400.



Fonte: Panedpojaman, Trepchatri e Limkatanyu (2014).

Figura 4 – Comprimento de flambagem de uma barra equivalente.



Fonte: A autora (2018).

$$l = \sqrt{\left(\frac{h_0}{2}\right)^2 + \left(b + \frac{b_w}{2}\right)^2} \quad (6)$$

Decompondo-se a força cortante que atua no tê superior ($V/2$) na direção da biela comprimida (l) e fazendo-se o equilíbrio de forças pelo Método dos Nós, é possível obter a força normal de compressão atuante na diagonal comprimida (N) como sendo igual à força cortante no tê superior ($V/2$) dividido pelo cosseno de ϕ (Figura 4). Da mesma forma, a área de atuação da força N é dada pela área normal à biela comprimida, dada pela área da menor largura do montante de alma ($b_w t_w$) multiplicada pelo cosseno de ϕ .

Conforme visto no item 2.1, a ABNT NBR 14323:2013 apresenta uma formulação para se obter o fator de redução χ_{fi} em função do índice de esbeltez reduzido $\lambda_{0,fi}$. Com o objetivo de se obter uma curva de abordagem semelhante, foram plotadas as curvas $\lambda_{0,fi} \times \chi_{fi}$ para os modelos analisados. Os valores de $\lambda_{0,fi}$ e χ_{fi} foram obtidos a partir dos resultados numéricos e em acordo com as Equações (7) e (8), respectivamente.

$$\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{V_p}{V_{cr}}} \quad (7)$$

$$\chi_{fi} = \frac{V}{V_p} \quad (8)$$

em que V é a força cortante resistente à FMAV, sendo igual a V' nos trechos correspondentes à plastificação e à flambagem inelástica e igual a V_{cr} , nos casos em que ocorre flambagem elástica.

Na Figura 5 pode-se observar como as curvas são coincidentes, mesmo se tratando de diferentes padrões, temperaturas de análise e perfis. Observa-se também que a curva da norma não é adequada para representar a FMAV, sendo necessárias modificações nas Equações (3) e (4), ajustando-se os parâmetros β e γ apresentados nas Equações (9) e (10).

$$\varphi_{0,fi} = \beta(1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) \quad (9)$$

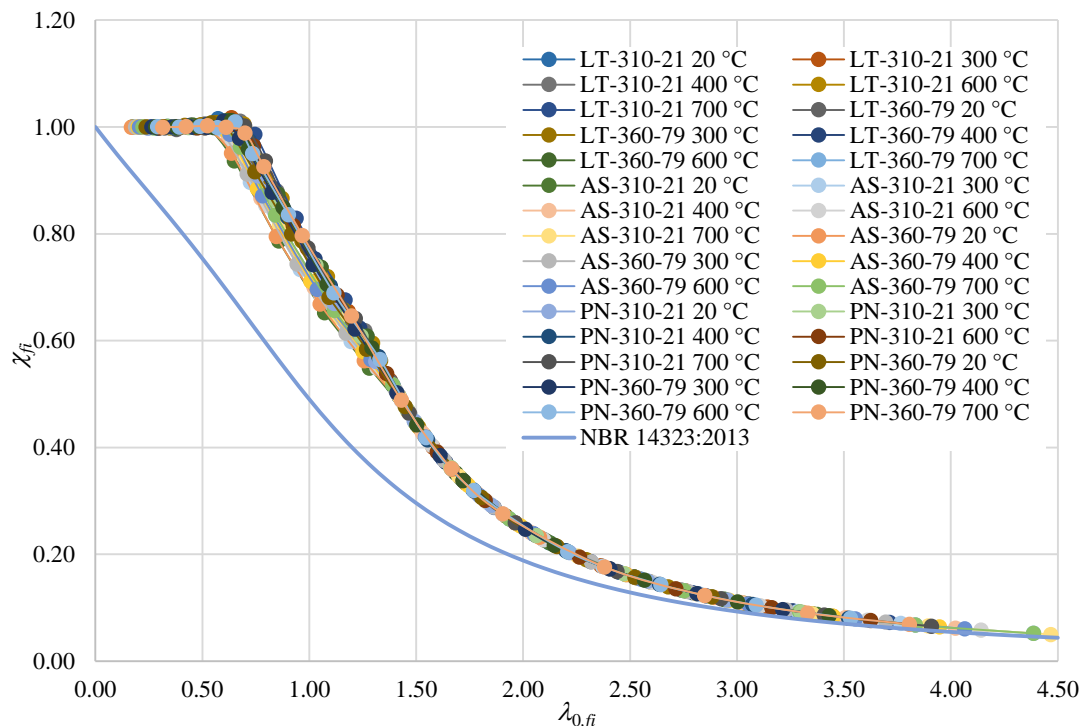
$$\alpha = \gamma \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (10)$$

sendo: E o módulo de elasticidade do aço em temperatura ambiente;

f_y a resistência ao escoamento do aço em temperatura ambiente;

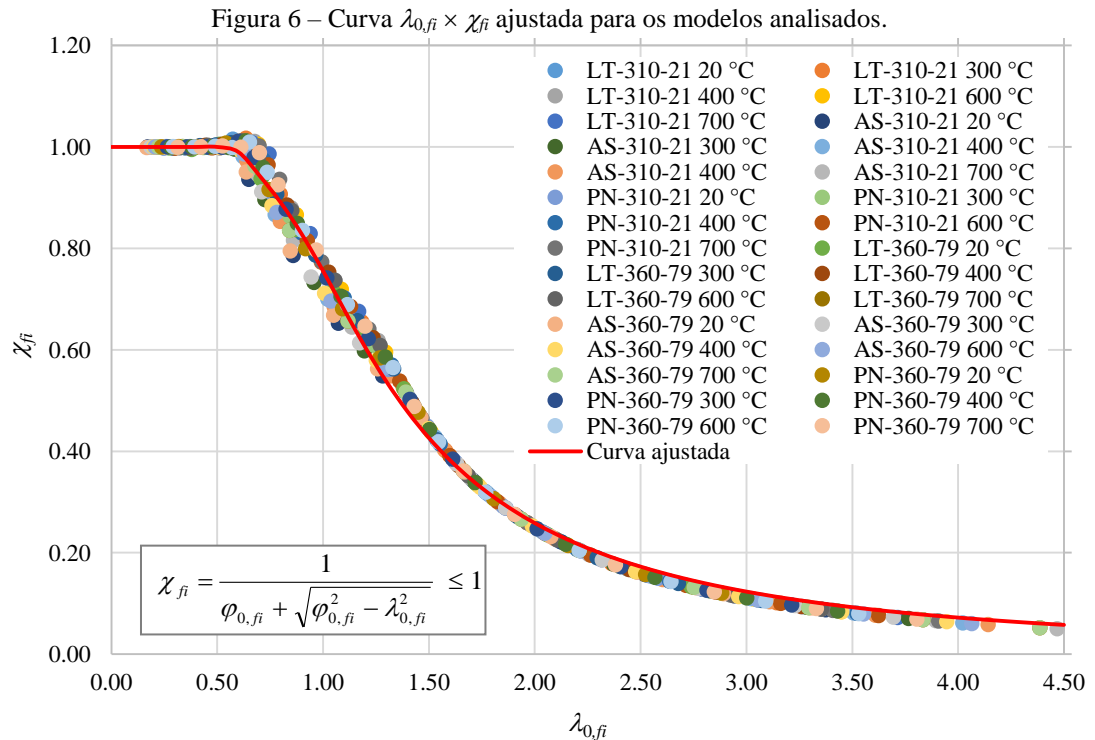
$\lambda_{0,fi}$ o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio, obtido pela Equação (7).

Figura 5 – Curva $\lambda_{0,fi} \times \chi_{fi}$ para os modelos analisados e segundo a ABNT NBR 14323:2013.



Fonte: A autora (2018).

Para calibração das constantes β e γ , buscou-se a curva que melhor se ajustasse às curvas apresentadas na Figura 5, propiciando ao mesmo tempo resultados próximos e o delineamento dos trechos correspondentes a diferentes modos de colapso, obtendo-se, então, β igual a 0,372 e γ igual a 0,033. A curva ajustada com esses parâmetros é apresentada na Figura 6, onde se observa que a mesma representa de forma satisfatória o fenômeno estudado.



A obtenção da força axial de plastificação (N_p) na diagonal comprimida se faz a partir da força cortante de plastificação da viga (V_p), por meio da Equação (11).

$$N_p = \frac{V_p}{2 \cos \phi} = A f_{y,\theta} = \frac{b_w t_w \cos \phi}{a} f_{y,\theta} \quad (11)$$

onde: V_p é a força cortante de plastificação;

ϕ é o ângulo entre a força cortante e a biela;

A é a área da biela em que atua a força axial de compressão;

b_w é a menor largura do montante de alma;

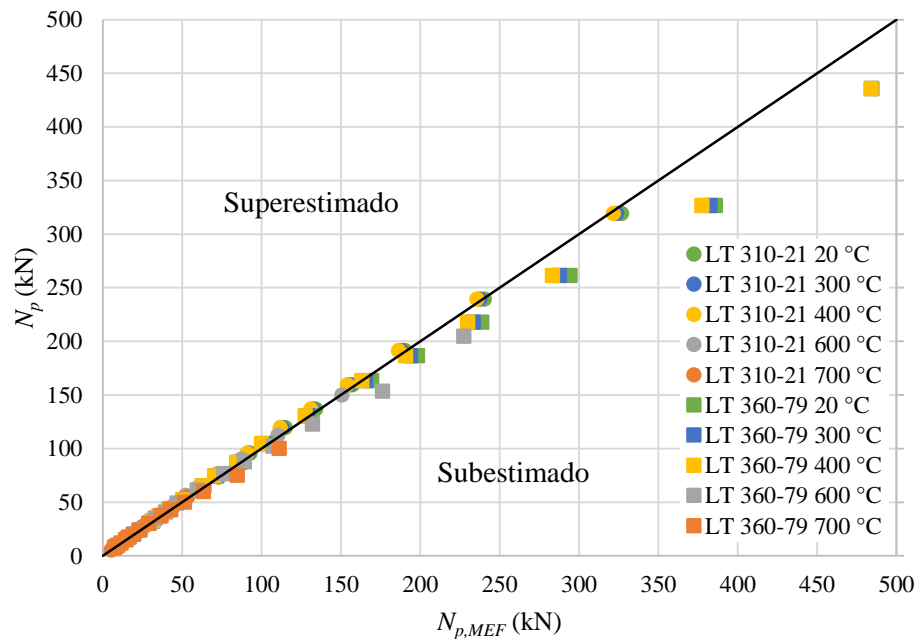
t_w é a espessura da alma da viga castelada;

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento do aço na temperatura (θ) de análise;

a é uma constante de ajuste que depende do padrão de castelação.

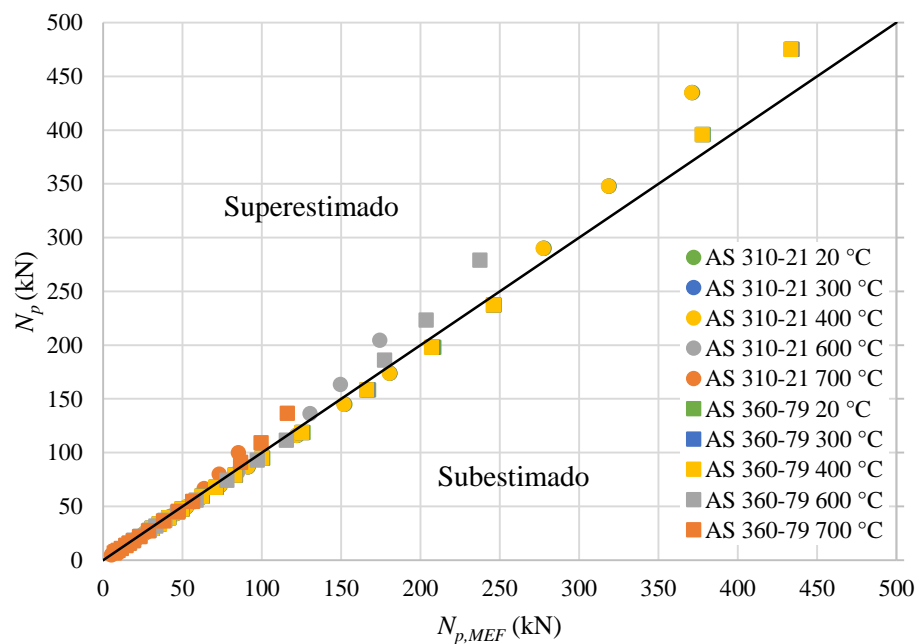
O comparativo entre os valores obtidos via análise numérica ($N_{p,MEF}$) e via formulação (N_p) podem ser observados nas Figuras 7, 8 e 9, para os diferentes padrões. Fazendo-se a minimização de erros, obteve-se a igual a 2,50, para os padrões Litzka e Peiner, e a igual a 1,25, para o padrão anglo-saxão.

Figura 7 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão Litzka.



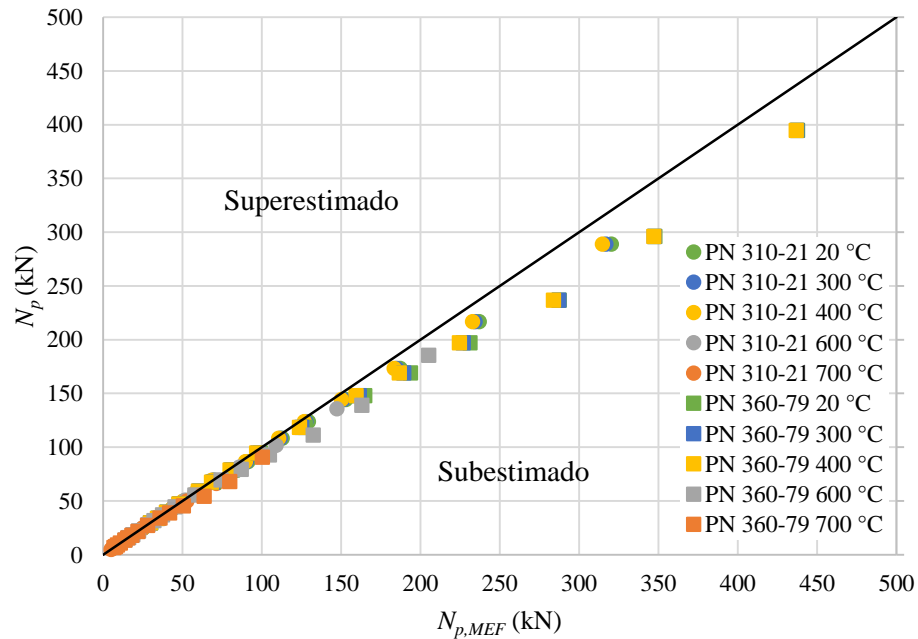
Fonte: A autora (2018).

Figura 8 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.



Fonte: A autora (2018).

Figura 9 – Comparativo entre força axial de plastificação via MEF e via formulação para o padrão Peiner.



Fonte: A autora (2018).

Apesar de, para o padrão anglo-saxão, alguns valores estarem superestimados, o valor médio da razão entre $N_{p,MEF}$ e N_p foi de 1,02.

A força axial de flambagem elástica (N_{cr}) na diagonal comprimida pode ser determinada pela curva de Euler (Equação 12).

$$N_{cr} = \frac{V_{cr}}{2 \cos \phi} = \frac{\pi^2 E_{\theta} A}{\lambda^2} \quad (12)$$

onde: V_{cr} é a força cortante de flambagem elástica;

ϕ é o ângulo entre a força cortante e a biela;

A é a área da biela em que atua a força axial de compressão;

E_{θ} é o módulo de elasticidade do aço na temperatura (θ) de análise;

λ é a esbeltez do montante de alma, dada pela Equação (13).

$$\lambda = K \frac{l \sqrt{12}}{t_w} \quad (13)$$

onde: l é o comprimento de uma barra equivalente, calculado conforme a Equação (6);

t_w é a espessura da alma da viga castelada;

K é uma constante de ajuste que varia com o padrão de castelação.

Os comparativos entre os valores obtidos via MEF e via formulação podem ser vistos nas Figuras 10, 11 e 12. Por meio de minimização de erros, obteve-se K igual a 0,40 para o padrão Litzka, K igual a 0,45 para o padrão Peiner e K igual a 0,50 para o padrão anglo-saxão. Justifica-se, para os padrões Peiner e Litzka, o uso de valores inferiores ao admitido para o padrão anglo-saxão pois a diagonal tracionada é mais larga nos padrões Peiner e Litzka que no padrão anglo-saxão, reduzindo indiretamente o comprimento l .

Figura 10 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão Litzka.

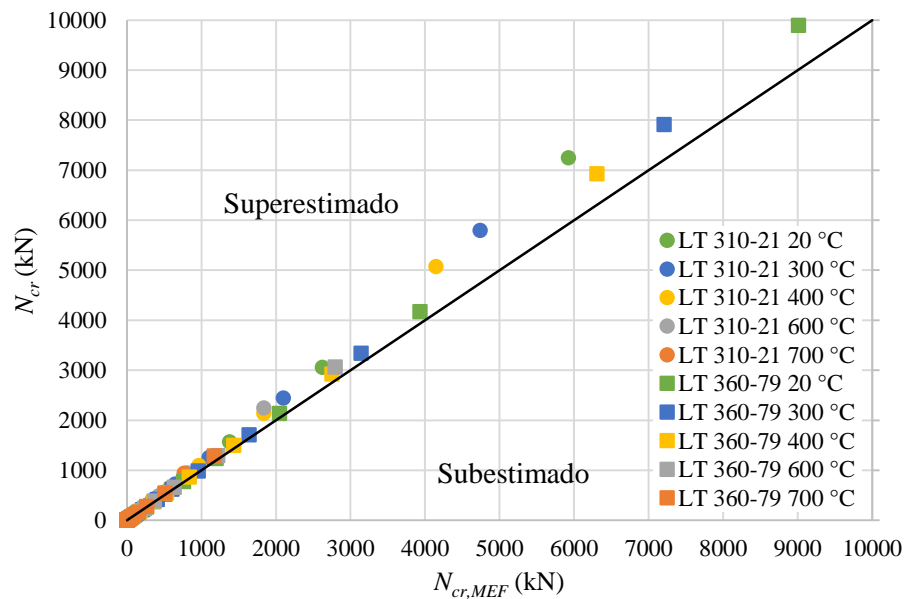


Figura 11 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.

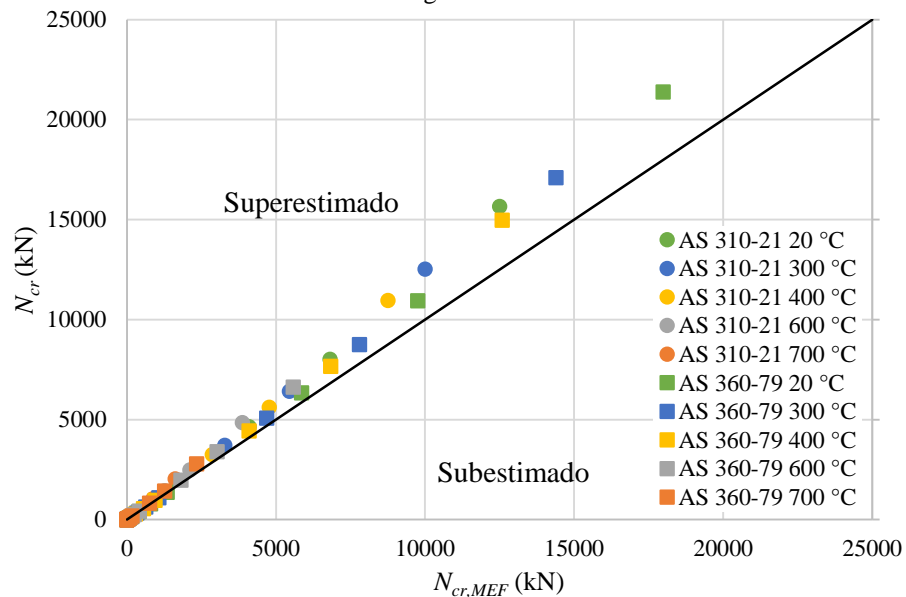
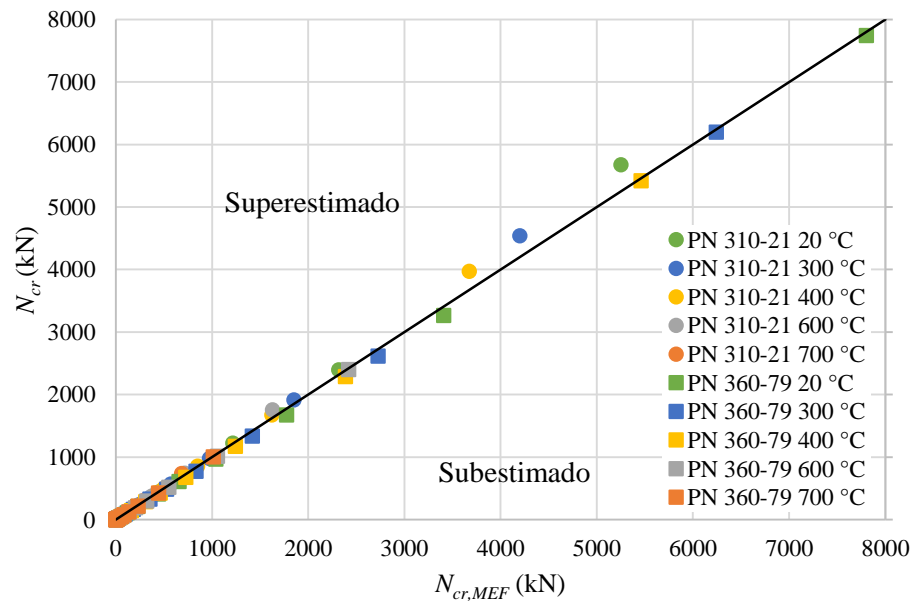


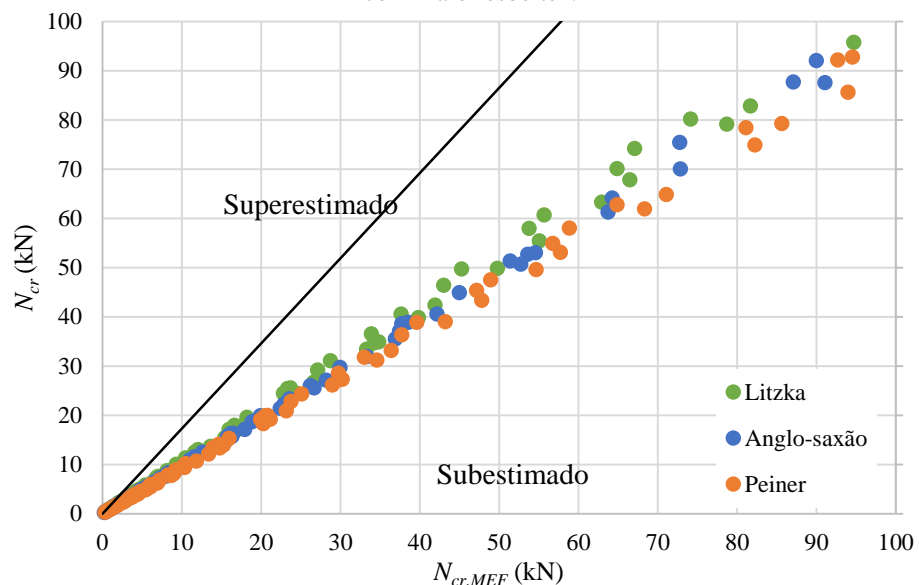
Figura 12 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para o padrão Peiner.



Fonte: A autora (2018).

Embora para as esbeltezes menores (plastificação) haja uma certa discrepância entre os valores obtidos via MEF e via formulação, tem-se que, nos trechos em que ocorre flambagem elástica (esbeltez alta), há uma boa concordância, como pode ser observado na Figura 13, o que é indispensável para a obtenção da envoltória de resistência dos perfis (trecho de flambagem elástica).

Figura 13 – Comparativo entre força axial crítica de flambagem via MEF e via formulação para perfis com maior esbeltez.



Fonte: A autora (2018).

A força cortante resistente à FMAV (V), em analogia à Equação (1), pode ser obtida pela Equação (14).

$$V = 2 \cos\phi \chi_{fi} N_p = \chi_{fi} V_p \quad (14)$$

onde: ϕ é o ângulo entre a força cortante (vertical) e a diagonal comprimida;

N_p é a força axial de plastificação, obtido com a Equação (11);

χ_{fi} é o fator de redução associado à compressão em situação de incêndio, dado pela Figura 6, onde $\varphi_{0,fi}$ e α são obtidos por meio das Equações (9) e (10), respectivamente.

Finalmente, o comparativo entre a força cortante resistente à FMAV obtida via MEF (V_{MEF}) e via formulação (V) é apresentado nas Figuras 14, 15 e 16.

Figura 14 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão Litzka.

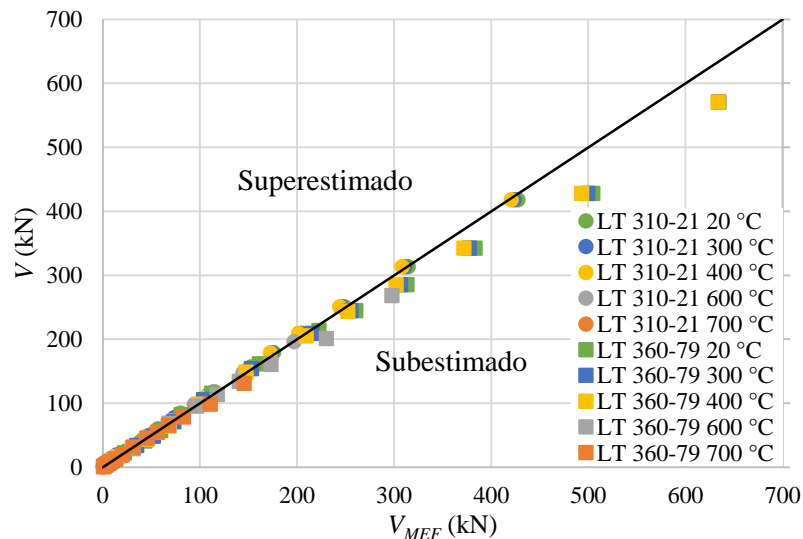


Figura 15 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão anglo-saxão.

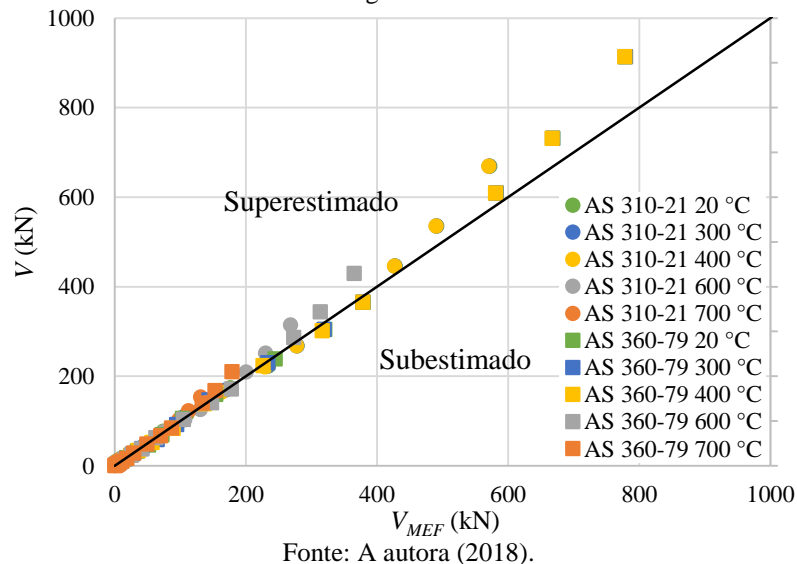
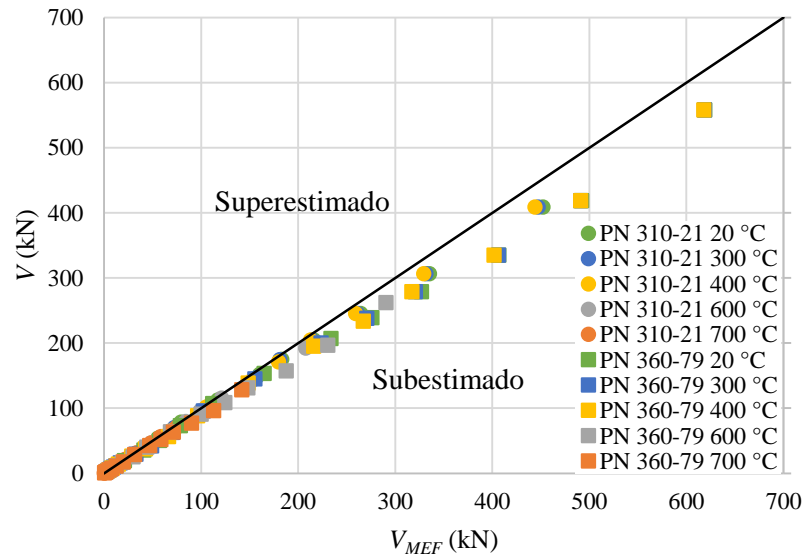


Figura 16 – Comparativo entre força cortante resistente à FMAV via MEF e via formulação para o padrão Peiner.



Embora haja dispersão nos resultados, observa-se que essa ocorre, em sua expressiva maioria para os casos em que o modo de colapso é a plastificação, como pode ser observado nas Figuras 17 e 18. Tal problema exige um estudo mais aprofundado quanto à máxima força cortante de plastificação nas vigas casteladas, que não está necessariamente associado sempre ao montante de alma, e, portanto, não será abordado no escopo deste trabalho.

Figura 17 – Comparativo entre força cortante resistente para colapso por FMAV para os padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner (removendo-se os casos de plastificação).

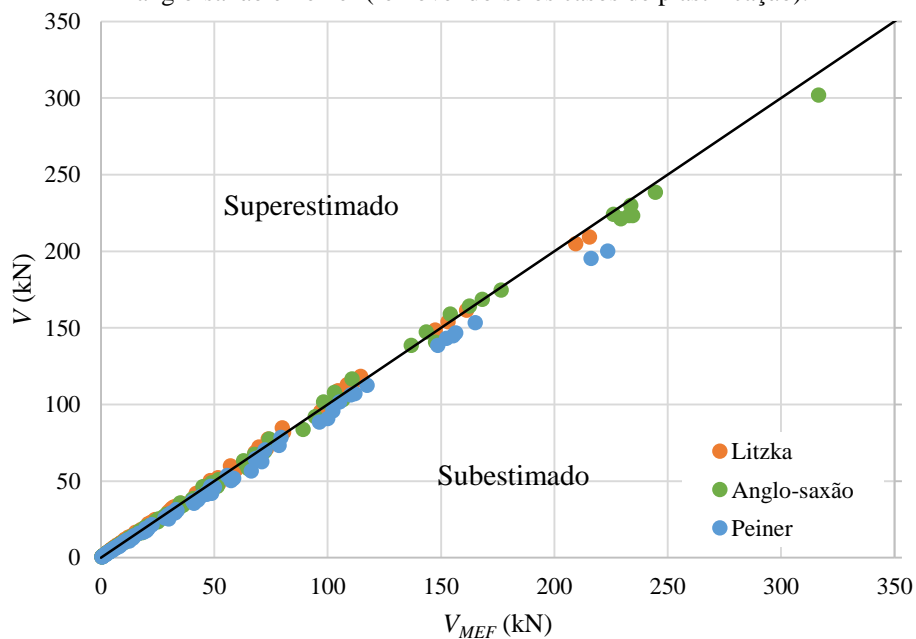
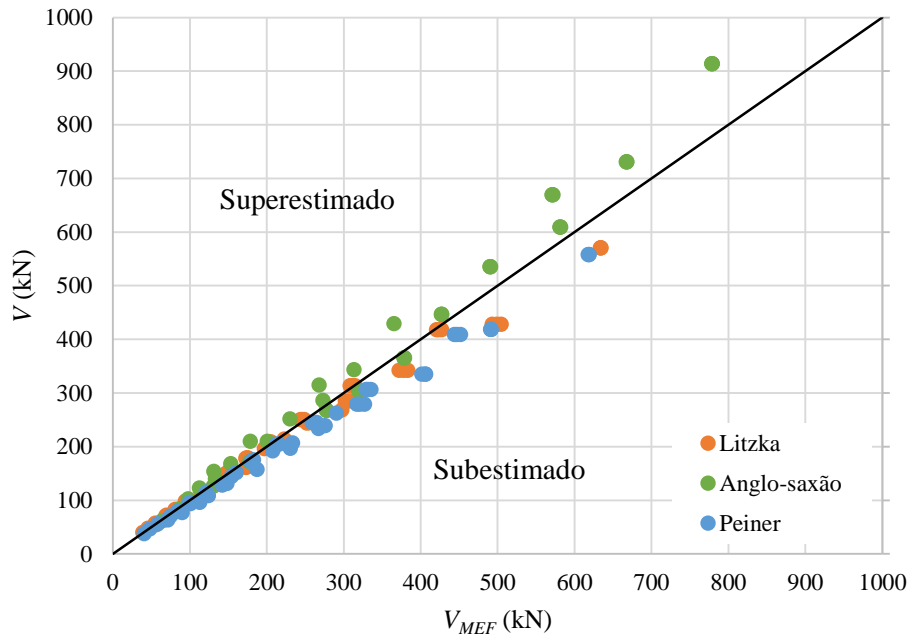


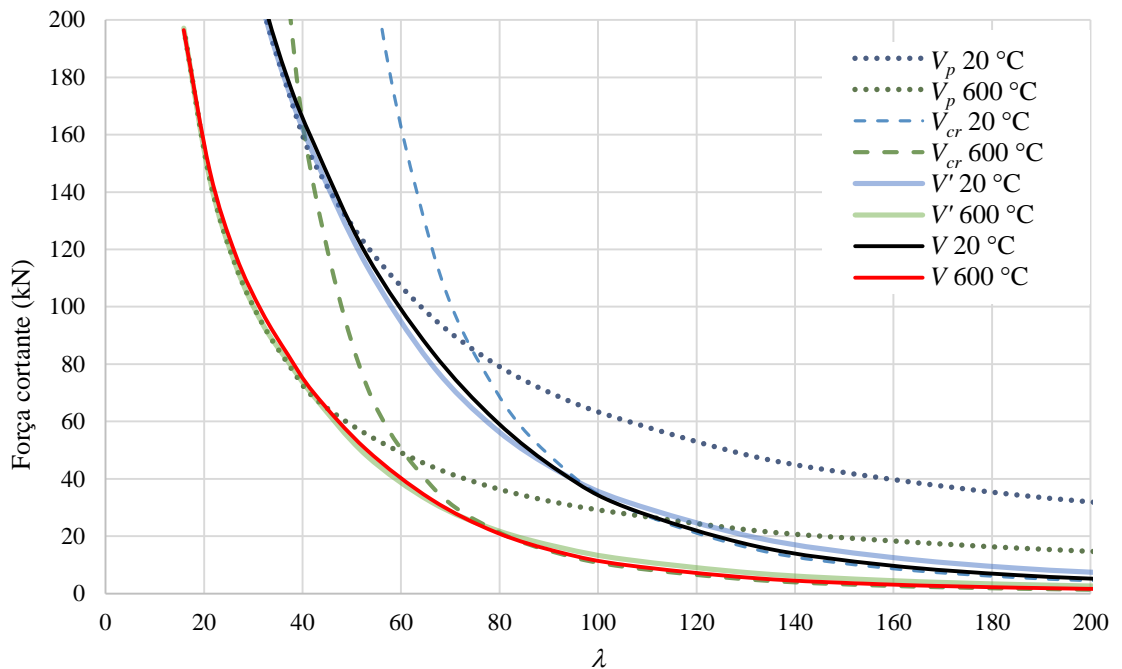
Figura 18 – Comparativo entre força cortante resistente para colapso por plastificação para os padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner (removendo-se os casos de FMAV).



Fonte: A autora (2018).

A força resistente à FMAV obtido pela formulação proposta (V) é apresentado na Figura 19, juntamente com os resultados obtidos via MEF (V_p , V_{cr} e V') para o modelo de montante de alma LT-310-21 (Padrão Litzka, obtido a partir do perfil W 310x21), a 20 °C e a 600 °C, com a esbelteza calculada conforme a Equação (13).

Figura 19 – Força cortante máxima no perfil LT-310-21 nas temperaturas de 20 °C e 600 °C.



Fonte: A autora (2018).

Observa-se que, embora a curva $\lambda_{0,fi} \times \chi_{fi}$, apresentada na Figura 6, tenha sido ajustada de forma a compreender todos os padrões de castelação estudados, há uma ótima concordância entre os valores obtidos pela formulação proposta e os valores obtidos via MEF (Figura 18).

3. ESTUDO COMPARATIVO

Para apurar a validade da formulação proposta para vigas que apresentam relações geométricas diferentes das estudadas, foi feita a análise numérica, com o auxílio do software ABAQUS, de 81 montantes de alma de vigas casteladas a partir de perfis brasileiros nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner, nas temperaturas de 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C, totalizando 405 casos de análise.

As características dos modelos numéricos também foram as mesmas usadas no Artigo 1, e que foram utilizadas para gerar o modelo semiempírico proposto neste trabalho. A relação das vigas estudadas é apresentada na Tabela 1.

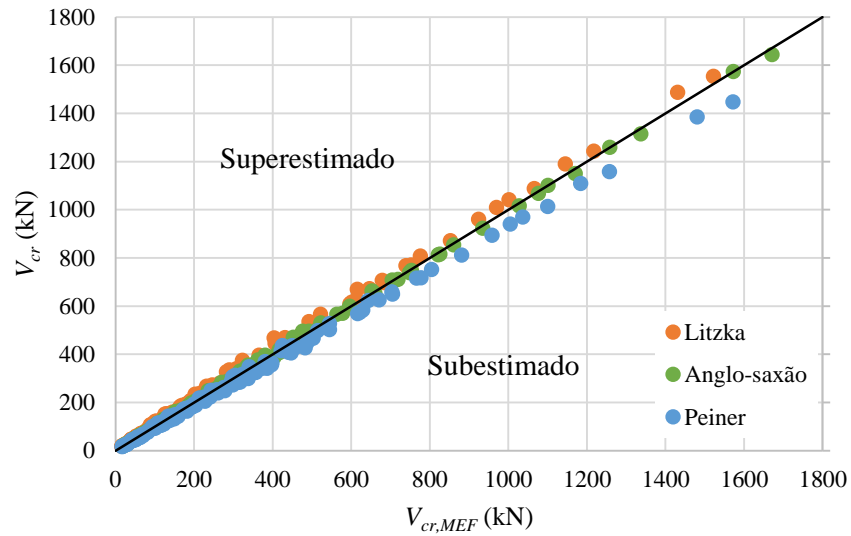
Tabela 1 – Relação das vigas estudadas.

Perfis originais		
W 150x13,0	W 310x21,0	W 460x52,0
W 150x18,0	W 310x32,7	W 460x89,0
W 150x24,0	W 310x38,7	W 460x106,0
W 200x15,0	W 360x32,9	W 530x66,0
W 200x19,3	W 360x51,0	W 530x82,0
W 200x31,3	W 360x64,0	W 530x101,0
W 250x17,9	W 410x38,8	W 610x101,0
W 250x28,4	W 410x60,0	W 610x125,0
W 250x38,5	W 410x75,0	W 610x174,0

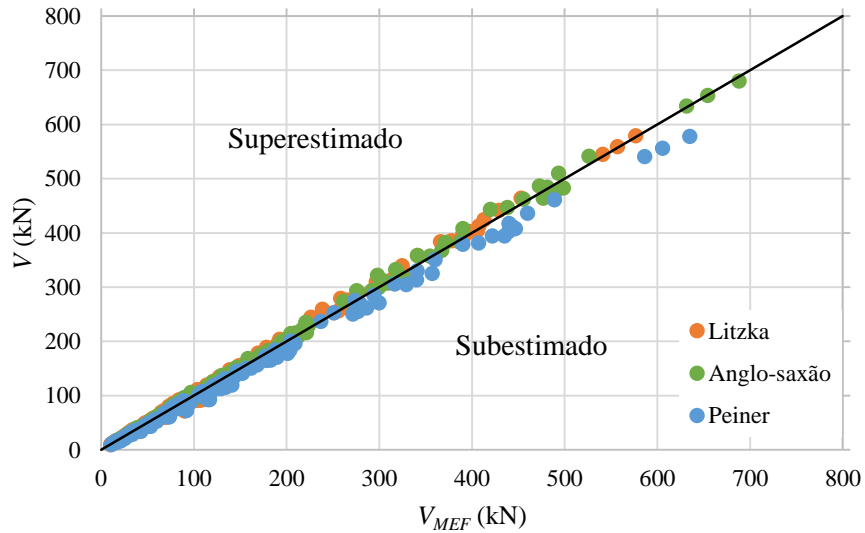
Fonte: A autora (2018).

Os comparativos entre a força cortante crítica de flambagem elástica (V_{cr}), a força cortante de plastificação (V_p) e a força cortante resistente à FMAV (V), obtidos via MEF e via formulação, são apresentados na Figura 20. Os resultados compreendem os modelos estudados nas temperaturas de 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C.

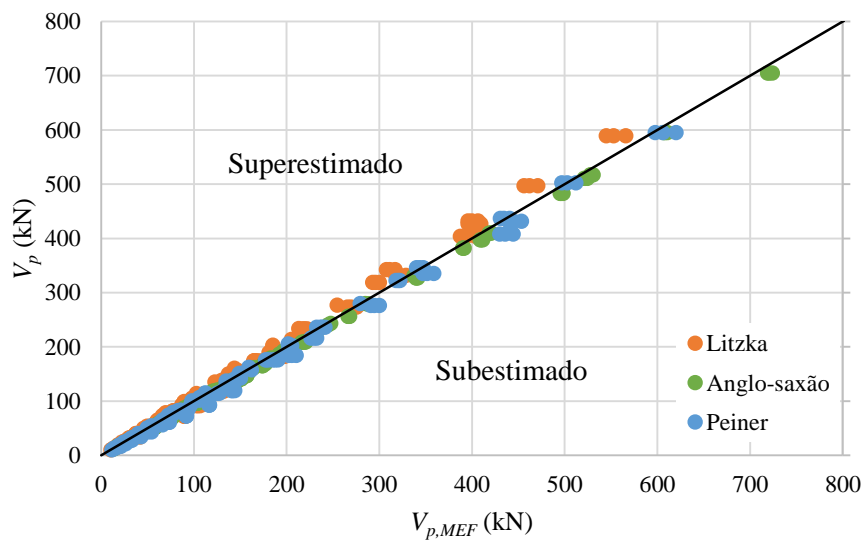
Figura 20 – Comparativos entre as forças cortantes obtidas via MEF e via formulação.



(a) força cortante crítica de flambagem elástica.



(b) força cortante resistente à FMAV.

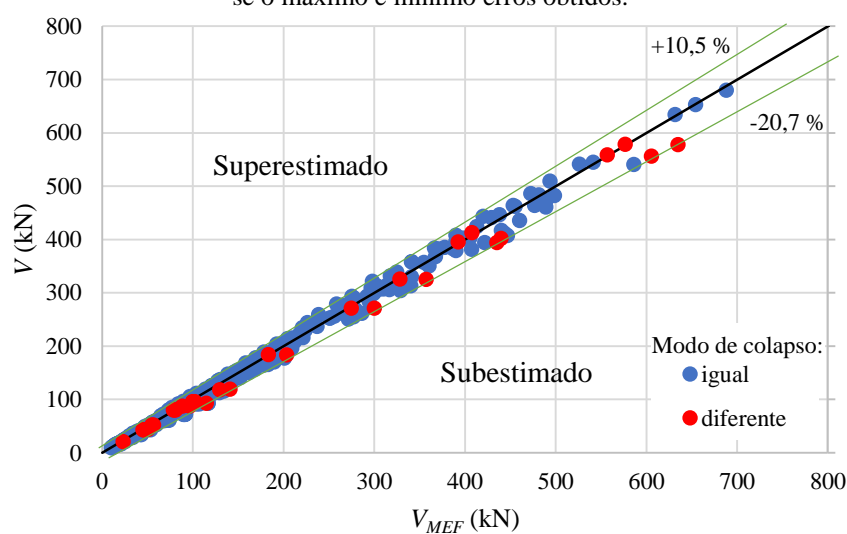


(c) força cortante de plastificação.

Fonte: A autora (2018).

Observa-se que a formulação é eficiente para a obtenção dos valores de força cortante de interesse para todos os padrões e temperaturas nos perfis estudados. O que se observa também, na Figura 21, é que para alguns pontos o modo de colapso identificado por meio da aplicação do modelo semiempírico é diferente do obtido nos resultados numéricos. Porém, a diferença no valor de χ_{fi} é de, no máximo, 15 % ocorrendo em um caso isolado (todos demais casos apresentam diferença menor que 10 %) e ainda sim, sem prejuízo ao resultado final.

Figura 21 – Comparativo entre o modo de colapso identificado com a formulação e via MEF, destacando-se o máximo e mínimo erros obtidos.



Fonte: A autora (2018).

Com esse estudo comparativo pode-se concluir que a formulação proposta é válida para vigas com parâmetros geométricos diferentes das vigas utilizadas para a construção do modelo semiempírico, ou seja, as relações fixadas, como $t_f/t_w = 1,51$, foram suficientes para representar toda a série de perfis de aço comumente utilizada para fabricação das vigas casteladas.

Ressalta-se que o presente estudo foi feito para vigas com taxa de expansão de 1,5, que é o valor comumente utilizado no mercado.

4. CONCLUSÕES

Esse trabalho propõe um modelo semiempírico para cálculo da força cortante resistente de vigas casteladas de aço quanto à flambagem do montante de alma por cisalhamento

em situação de incêndio. Esse modelo tem por base a formulação da ABNT NBR 14323:2013 para barras submetidas a força axial de compressão, fazendo-se analogia da diagonal comprimida do montante de alma com o modelo de biela.

Para calibração das equações foram utilizados modelos numéricos de montantes de alma de vigas casteladas nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner, obtidos com base em perfis W 310x21 e W 360x79. Nos modelos, variou-se a esbeltez do montante de alma por meio das espessuras da mesa e da alma, mas mantendo-se a relação entre essas constante e igual a 1,51.

Realizou-se um estudo comparativo abrangendo a gama de perfis I laminados para vigas de aço disponíveis no Brasil, com três seções transversais para cada altura, visando comprovar a eficácia e abrangência do modelo proposto. Observou-se que o modelo é válido para perfis de diferentes alturas e relações geométricas e que, para algumas vigas, embora o modo de colapso identificado pelo modelo semiempírico tenha sido diferente do identificado por meio do modelo numérico, o resultado final de força cortante resistente foi satisfatório, com superestimativas de no máximo +10,5 % e subestimativas de no máximo -20,7 % em relação aos modelos numéricos. Ressalta-se que, na formulação proposta por Panedpojaman, Trepchatri e Limkatanyu (2014) para vigas celulares sujeitas à FMAV, essas diferenças superam 50 %.

Como o modelo semiempírico proposto é satisfatório em temperatura ambiente e em situação de incêndio, adota a mesma sistemática das normas atualmente em uso e é de simples aplicação, conclui-se que esse modelo pode ser usado na prática de projeto, desde que se aplique os coeficientes de segurança das normas pertinentes para obtenção da força cortante resistente de cálculo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal de Viçosa pelo apoio para a realização e divulgação deste trabalho.

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. 237 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

DELESQUES, R. Stabilité des montants de poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 3, p.26-33, 1968.

DELESQUES, R. Le calcul des poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 4, p. 41-51, 1969.

GALAMBOS, A. R.; HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. Optimum expansion ratio of castellated steel beams. **Engineering Optimization**, v. 1, p. 213-225, 1975.

LAWSON, R. M.; LIM, J.; HICKS, S. J.; SIMMS, W. I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, p. 614-629, 2006.

PANEDPOJAMAN, P.; TREPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 76, p. 92-104, 2014.

REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 1202-1207, 1998.

TSAVDARIDIS, K. D.; D'MELLO, C. Web buckling study of the behavior and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 1605-1620, 2011.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WANG, P.; WANG, X.; MA, N. Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings. **Engineering Structures**, v. 75, p. 315-326, 2014.

ARTIGO 3 – ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO À FLAMBAGEM DO MONTANTE DE ALMA POR CISALHAMENTO ADAPTADOS PARA ALTAS TEMPERATURAS

Larice Gomes Justino^a, José Carlos Lopes Ribeiro^a, Gustavo de Souza Veríssimo^a, Rita de Cássia Silva Sant’Anna Alvarenga^a

^aDepartamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, Campus da UFV, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

*Manuscrito preparado para submissão a revista na área de Engenharias I

RESUMO

A flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV) é um dos modos de colapso próprios de vigas com aberturas sequenciais na alma e também o modo de colapso preponderante em situação de incêndio, uma vez que, com o aumento da temperatura, o modo de elasticidade do aço reduz mais rapidamente que sua resistência, fazendo com que a viga fique mais propensa a falhar por instabilidade. Considerando esses fatos, o presente trabalho apresenta uma comparação entre as formulações existentes para determinação da força cortante resistente à FMAV e resultados numéricos validados. Teve-se por objetivo avaliar se as mesmas são válidas para situação de incêndio com a modificação dos valores de módulo de elasticidade e de resistência ao escoamento do aço de acordo com a temperatura de análise. O que se evidenciou é que as formulações apresentadas são satisfatórias em temperatura ambiente, mas, em sua maioria, não são aplicáveis à situação de incêndio.

Palavras-chave: Vigas casteladas, Flambagem do montante de alma por cisalhamento, Modelos analíticos, Incêndio.

ABSTRACT

Web-post buckling (WPB) is one of the particular failure modes of beams with sequential web openings and also the preponderant failure mode in fire. With the increase of the temperature, the elasticity modulus of the steel reduces faster than its resistance, so the beam become more propitious to fail due to instability. This paper presents the comparison between existing formulations for determination of shear strength for web-post buckling (WPB) and validated numerical results. The objective was to evaluate if they are valid in fire conditions, with the modification of steel elasticity modulus and resistance according to the temperature of analysis. It was evidenced that the formulations presented are satisfactory at ambient temperature, but most of that are not applicable in fire.

Keywords: Castellated Beams, Web-post buckling by shear, Analytical Models, Fire.

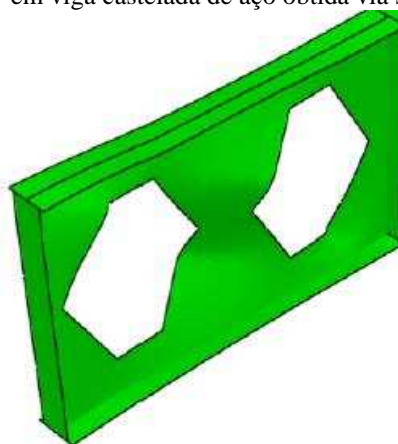
1. INTRODUÇÃO

A difusão do uso de vigas com aberturas sequenciais na alma, ditas vigas alveolares, teve início na década de 40 devido à necessidade de perfis com alturas superiores ou intermediárias às produzidas pelas siderúrgicas da época. Porém, com o encarecimento da mão de obra, essa solução deixou de ser competitiva. Na década de 90, com o desenvolvimento da automação industrial e devido às vantagens estruturais e arquitetônicas dessa tipologia construtiva, essa solução voltou a ser competitiva e sua produção e estudos foram retomados.

As vigas alveolares são geralmente obtidas a partir de perfis de alma cheia cortados ao longo da alma e soldados gerando aberturas hexagonais (vigas casteladas), circulares (vigas celulares) ou alongadas. Essas aberturas permitem a integração entre a estrutura e as instalações prediais, o que leva à redução da altura dos pavimentos e, conseqüentemente, da altura total da edificação. Uma outra vantagem é que o aumento da altura da viga sem aumento do peso acarreta em uma maior inércia e maior relação resistência/peso, sendo as vigas alveolares indicadas para grandes vãos e para situações em que os estados limites de serviço condicionam o dimensionamento.

A presença de aberturas na alma leva a uma modificação da distribuição de tensões na viga em comparação às vigas de alma cheia. Consequentemente, as vigas alveolares apresentam modos de colapso próprios, sendo a flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMAV) um deles. A FMAV consiste na formação de uma curvatura dupla no montante de alma da viga, ao longo de uma diagonal comprimida (Figura 1).

Figura 1 – FMAV em viga castelada de aço obtida via simulação numérica.



Fonte: Vieira (2011).

A FMAV tende a ser o modo de colapso mais crítico em situação de incêndio, principalmente em vigas alveolares de alma esbelta, uma vez que, com o aumento da temperatura, o módulo de elasticidade do aço reduz mais rapidamente que sua resistência, fazendo com que a viga fique mais propensa a modos de colapso por instabilidade (WONG, BURGESS e PLANK, 2010, WANG P., WANG X. e LIU, 2014; NADJAI *et al.*, 2016).

Delesques (1968; 1969); Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011); Pourbehi e Pirmoz (2015); Vieira (2015) e Wang *et al.* (2016) estudaram vigas casteladas sujeitas à FMAV e propuseram formulações para a obtenção da força cortante resistente desse modo de colapso em temperatura ambiente. Com base em estudos recentes (Artigo 2), propôs-se um modelo semiempírico fundamentado na analogia do modelo de biela para obtenção da força cortante resistente de vigas casteladas de aço em situação de incêndio.

O presente trabalho teve por objetivo analisar a validade das formulações existentes para temperatura ambiente também em situação de incêndio, pela simples modificação do módulo de elasticidade e da resistência ao escoamento do aço, conforme a temperatura. Assim, desenvolveu-se um estudo numérico de vigas casteladas nos padrões Litzka,

anglo-saxão e Peiner, compreendendo todas as alturas de vigas laminadas produzidas no Brasil. Os resultados numéricos oriundos desse estudo foram utilizados como base de comparação para avaliar as formulações citadas na literatura.

2. METODOLOGIA

Para se obter valores de força cortante resistente relativos à FMAV de vigas casteladas em situação de incêndio que possam ser utilizados como base de comparação no presente trabalho, realizou-se a análise numérica, no software ABAQUS, de 27 montantes de alma para cada padrão de castelação, abarcando toda a gama de perfis I laminados utilizados para vigas no Brasil (Tabela 1). Nessas análises, a relação da altura das vigas casteladas estudadas em relação à viga original (taxa de expansão) foi de 1,5 (GALAMBOS, HOSAIN e SPEIRS, 1975).

Tabela 1 – Relação dos modelos numéricos analisados.

Perfil original	Modelo		
	Litzka	Anglo-saxão	Peiner
W 150x13,0	LT-150-13	AS-150-13	PN-150-13
W 150x18,0	LT-150-18	AS-150-18	PN-150-18
W 150x24,0	LT-150-24	AS-150-24	PN-150-24
W 200x15,0	LT-200-15	AS-200-15	PN-200-15
W 200x19,3	LT-200-19	AS-200-19	PN-200-19
W 200x31,3	LT-200-31	AS-200-31	PN-200-31
W 250x17,9	LT-250-17	AS-250-17	PN-250-17
W 250x28,4	LT-250-28	AS-250-28	PN-250-28
W 250x38,5	LT-250-38	AS-250-38	PN-250-38
W 310x21,0	LT-310-21	AS-310-21	PN-310-21
W 310x32,7	LT-310-32	AS-310-32	PN-310-32
W 310x38,7	LT-310-38	AS-310-38	PN-310-38
W 360x32,9	LT-360-32	AS-360-32	PN-360-32
W 360x51,0	LT-360-51	AS-360-51	PN-360-51
W 360x64,0	LT-360-64	AS-360-64	PN-360-64
W 410x38,8	LT-410-38	AS-410-38	PN-410-38
W 410x60,0	LT-410-60	AS-410-60	PN-410-60
W 410x75,0	LT-410-75	AS-410-75	PN-410-75
W 460x52,0	LT-460-52	AS-460-52	PN-460-52
W 460x89,0	LT-460-89	AS-460-89	PN-460-89
W 460x106,0	LT-460-106	AS-460-106	PN-460-106
W 530x66,0	LT-530-66	AS-530-66	PN-530-66
W 530x82,0	LT-530-82	AS-530-82	PN-530-82
W 530x101,0	LT-530-101	AS-530-101	PN-530-101
W 610x101,0	LT-610-101	AS-610-101	PN-610-101
W 610x125,0	LT-610-125	AS-610-125	PN-610-125
W 610x174,0	LT-610-174	AS-610-174	PN-610-174

Fonte: A autora (2018).

Os modelos numéricos foram concebidos com as mesmas características apresentadas no Artigo 1 e, partindo da hipótese de distribuição homogênea de temperatura ao longo do perfil, foram analisados nas temperaturas de 20 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C.

Nas simulações, considerou-se aço ASTM A572 grau 50, como no Artigo 1 e no Artigo 2. Para o estudo em altas temperaturas, os valores de módulo de elasticidade ($E_{a,\theta}$) e de resistência ao escoamento ($f_{y,\theta}$) do aço foram alterados de acordo com as indicações da norma ABNT NBR 14323:2013, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades do aço utilizadas na análise.

Temperatura (θ)	$f_{y,\theta}$ (MPa)	$E_{a,\theta}$ (GPa)
20 °C	345,00	200
300 °C	345,00	160
400 °C	345,00	140
600 °C	162,15	62
700 °C	79,35	26

Fonte: A autora (2018).

A análise numérica realizada foi dividida em duas etapas: a primeira, em que é realizada uma análise de flambagem para se obter o autovalor e o autovetor associados ao primeiro modo de flambagem; e a segunda, realizada pelo método de Riks para se obter o fator de proporcionalidade de carga máximo. Como a segunda etapa corresponde a uma análise não-linear geométrica e material, o produto do fator de carga máximo pelo carregamento aplicado resulta na força cortante resistente.

Com base nas 81 vigas casteladas enumeradas na Tabela 1, calculou-se a força cortante resistente à FMAV por meio da modelagem numérica descrita e com as formulações propostas por Delesques (1968; 1969); Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011); Vieira (2015), Wang *et al.* (2016) e conforme o Artigo 2. Em todos os casos, considerou-se a mesma alteração nas características do aço apresentadas na Tabela 2. A formulação de Pourbehi e Pirmoz (2015) não foi utilizada neste trabalho por se mostrar inconsistente nos casos de flambagem inelástica.

Por fim, comparou-se os resultados obtidos por meio das formulações citadas com os obtidos na análise numérica com o software ABAQUS, evidenciando as formulações mais adequadas para cálculo da FMAV de vigas casteladas em situação de incêndio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresentam-se os resultados de força cortante resistente à FMAV (V) obtidos com o modelo numérico e com as formulações estudadas, para temperatura ambiente (20 °C). Observa-se que as formulações são, em geral, satisfatórias, sobretudo para o padrão anglo-saxão, como pode ser melhor observado na Tabela 3, que apresenta a média, o desvio padrão e os valores máximo e mínimo encontrados na razão entre o resultado obtido com a formulação e o resultado numérico.

Tabela 3 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para a temperatura ambiente.

		Delesques (1968)	Delesques (1969)	Gholizadeh (2011)	Vieira (2015)	Wang (2016)	Justino ¹ (2018)
Litzka	Média	1,26	1,24	0,98	0,91	1,36	1,00
	Desvpad.	0,24	0,24	0,14	0,03	0,11	0,07
	COV	19%	20%	14%	4%	8%	7%
	Máximo	1,73	1,70	1,19	0,95	1,56	1,10
	Mínimo	0,90	0,88	0,77	0,82	1,08	0,79
Anglo-saxão	Média	0,97	0,95	0,93	0,88	0,87	1,01
	Desvpad.	0,05	0,06	0,09	0,06	0,10	0,05
	COV	6%	6%	10%	7%	11%	5%
	Máximo	1,06	1,04	1,09	1,08	1,05	1,09
	Mínimo	0,86	0,83	0,80	0,84	0,74	0,92
Peiner	Média	1,11	1,09	0,84	0,88	1,29	0,92
	Desvpad.	0,16	0,16	0,07	0,03	0,10	0,06
	COV	14%	15%	8%	4%	8%	6%
	Máximo	1,44	1,44	0,97	0,94	1,46	1,03
	Mínimo	0,85	0,83	0,73	0,79	1,07	0,79

¹ Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

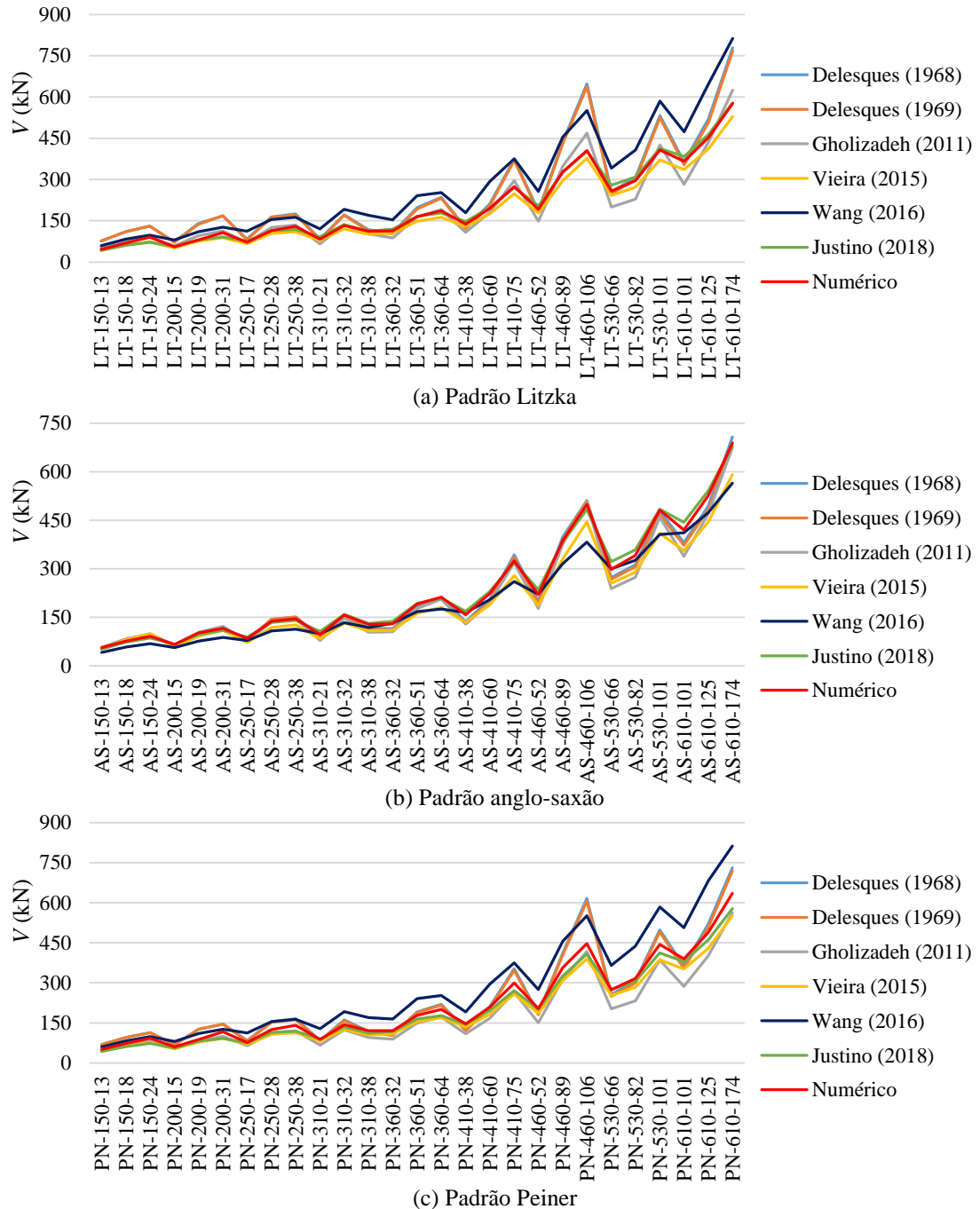
Fonte: A autora (2018).

Observa-se que, de fato, a formulação simplificada proposta por Delesques (1969) é correspondente à formulação de Delesques (1968) que apresenta muitas variáveis. Observa-se também que, embora tenham sido desenvolvidas mais especificamente para vigas casteladas com a relação entre o passo (p) e a menor largura do montante de alma (b_w) igual a 3, que é o caso dos padrões Litzka e Peiner, essas formulações se mostraram mais satisfatórias para o padrão anglo-saxão, em que essa relação é igual a 4,32.

Wang *et al.* (2016) afirmam que a formulação proposta por eles se ajusta melhor aos resultados experimentais quando dividida por 1,2. Ao se utilizar dessa afirmação, os resultados dos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner levam a uma média de 1,14; 0,72 e 1,08, respectivamente, ou seja, tem-se melhores resultados para os padrões Litzka e

Peiner e resultados piores para o padrão anglo-saxão, mas ainda assim a favor da segurança.

Figura 2 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulação e via MEF.

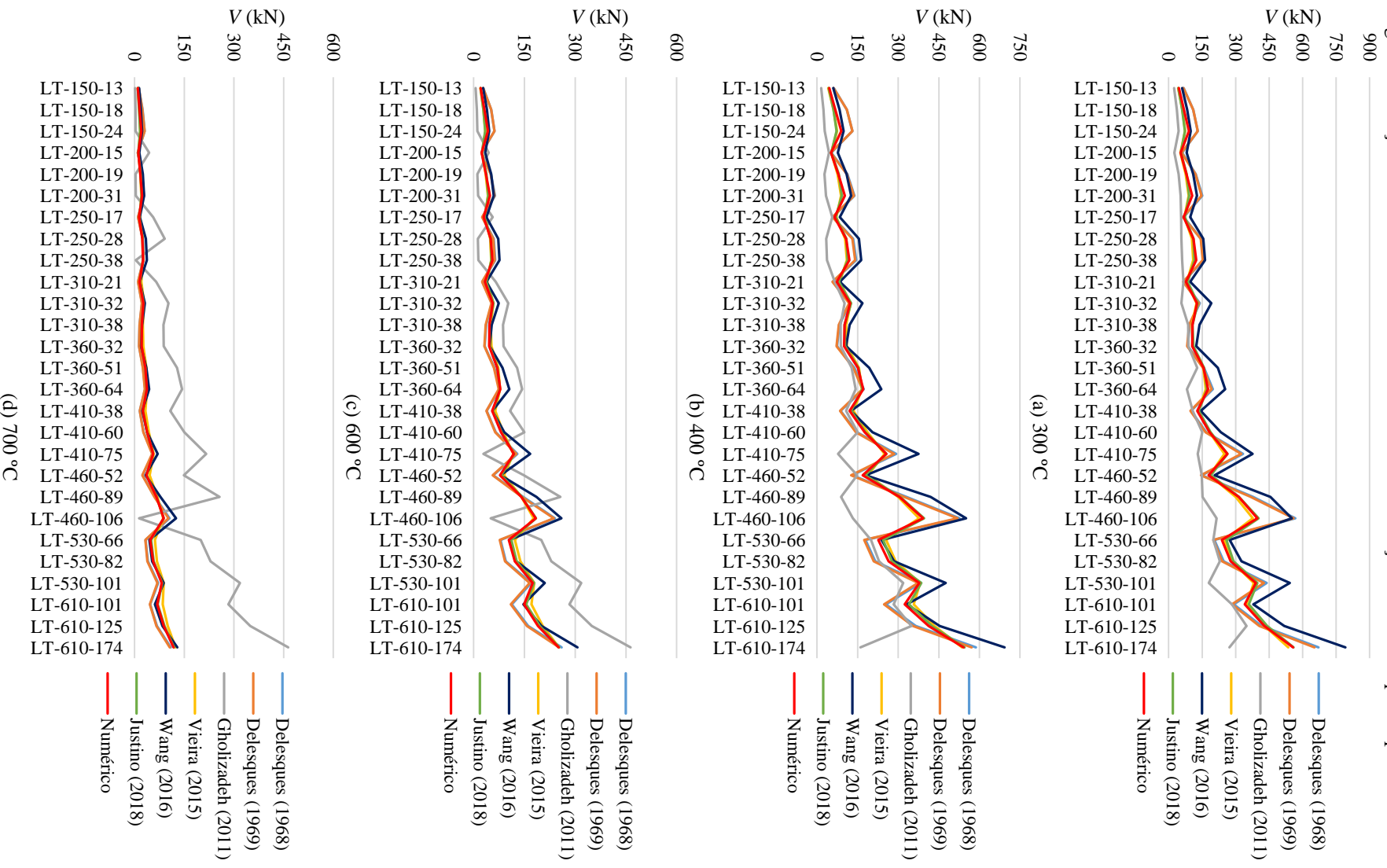


Observação: Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

Quanto à análise nas temperaturas de 300 °C, 400 °C, 600 °C e 700 °C, tem-se os resultados apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 para os padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner, respectivamente, e a análise da razão entre os resultados obtidos pelas formulações e pelo modelo numérico nas Tabelas 4 e 5.

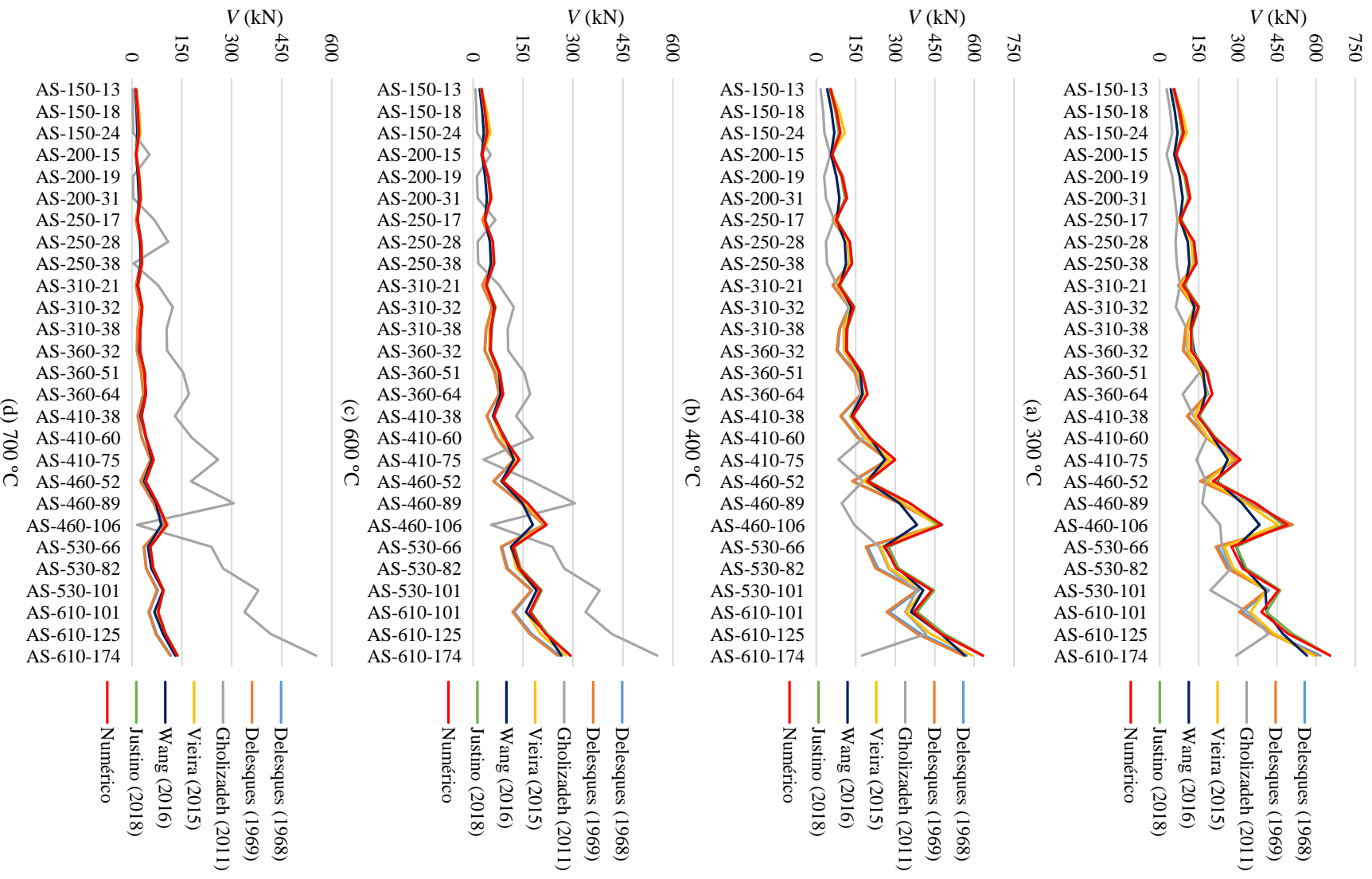
Figura 3 – Força cortante resistente à FMA V obtida via formulações e via MEF para o padrão Lizka.



Observação: Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

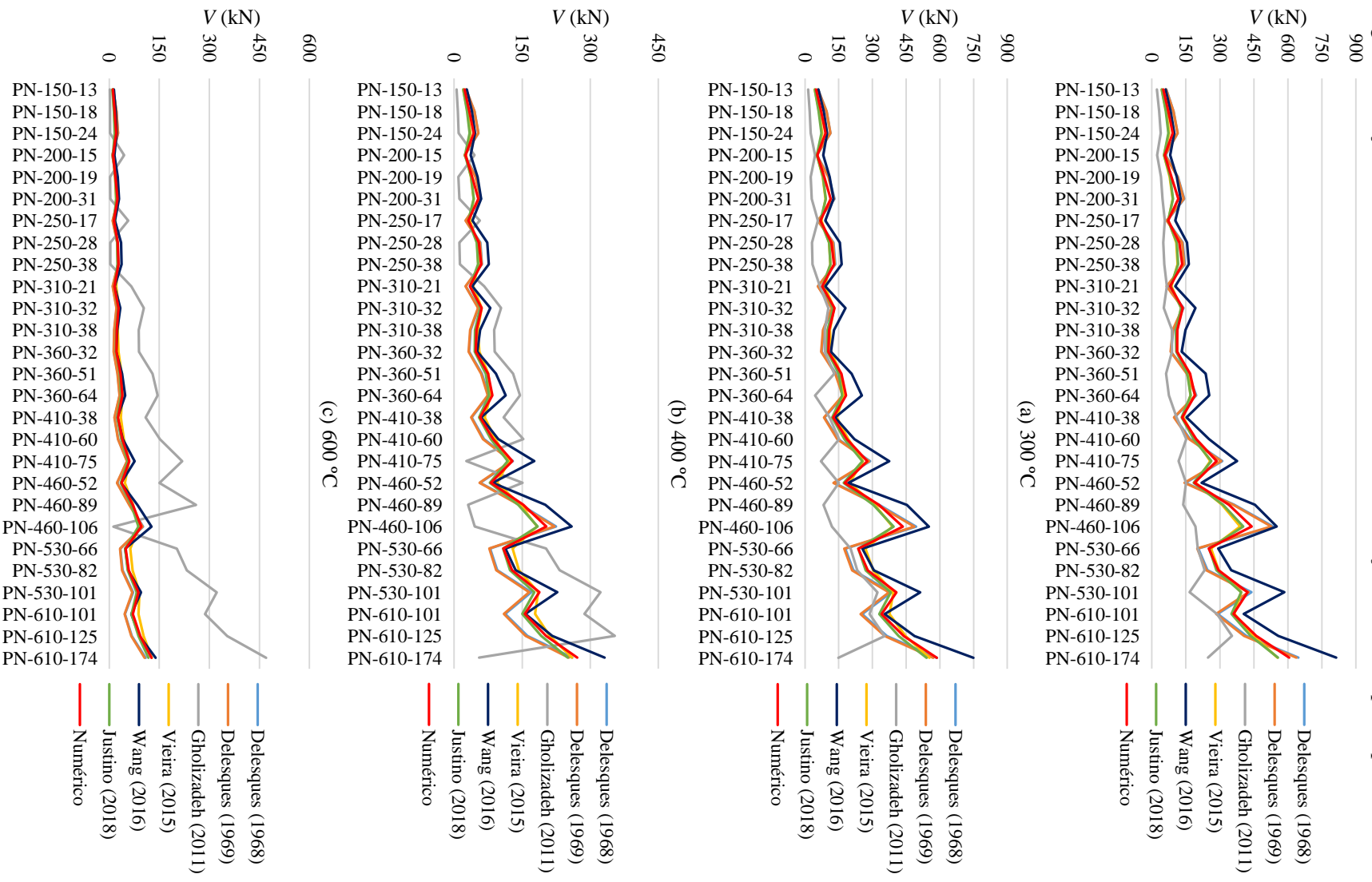
Figura 4 – Força cortante resistente à FMAV obtida via formulações e via MEF para o padrão anglo-saxão.



Observação: Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

Figura 5 – Força cortante resistente à FMA V obtida via formulações e via MEF para o padrão Peiner.



Observação: Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

Tabela 4 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para as temperaturas de 300 °C e 400 °C.

		Delesques (1968)	Delesques (1969)	Gholizadeh (2011)	Vieira (2015)	Wang (2016)	Justino ¹ (2018)	
300 °C	Litzka	Média	1,12	1,10	0,65	0,97	1,30	1,00
		Desvpad	0,25	0,25	0,17	0,06	0,13	0,07
		COV	22%	23%	26%	6%	10%	7%
		Máximo	1,62	1,62	0,85	1,06	1,52	1,11
		Mínimo	0,78	0,76	0,45	0,82	1,09	0,80
	Anglo-saxão	Média	0,91	0,89	0,64	0,92	0,91	1,01
		Desvpad	0,08	0,09	0,20	0,06	0,12	0,04
		COV	9%	11%	32%	7%	13%	4%
		Máximo	1,04	1,04	0,88	1,14	1,11	1,08
		Mínimo	0,75	0,72	0,42	0,88	0,75	0,94
	Peiner	Média	1,01	0,99	0,57	0,94	1,26	0,93
		Desvpad	0,18	0,18	0,19	0,07	0,10	0,06
		COV	18%	18%	34%	8%	8%	6%
		Máximo	1,33	1,32	0,82	1,06	1,44	1,03
		Mínimo	0,75	0,73	0,37	0,79	1,07	0,79
400 °C	Litzka	Média	1,04	1,02	0,64	1,02	1,25	1,01
		Desvpad	0,26	0,26	0,27	0,08	0,15	0,06
		COV	25%	25%	42%	8%	12%	6%
		Máximo	1,64	1,64	0,90	1,15	1,49	1,10
		Mínimo	0,72	0,71	0,29	0,83	1,02	0,81
	Anglo-saxão	Média	0,87	0,85	0,66	0,95	0,92	1,01
		Desvpad	0,11	0,11	0,30	0,06	0,10	0,03
		COV	12%	13%	46%	7%	11%	3%
		Máximo	1,05	1,04	0,93	1,18	1,07	1,06
		Mínimo	0,69	0,66	0,27	0,91	0,75	0,94
	Peiner	Média	0,94	0,93	0,58	0,99	1,22	0,93
		Desvpad	0,18	0,19	0,29	0,10	0,12	0,05
		COV	20%	20%	49%	10%	10%	6%
		Máximo	1,33	1,33	0,87	1,16	1,46	1,02
		Mínimo	0,69	0,68	0,24	0,80	1,04	0,80

¹ Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

Como esperado, as formulações que não foram desenvolvidas para situação de incêndio não apresentaram resultados tão bons com o aumento da temperatura. Destaca-se a formulação desenvolvida por Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011), que apresenta resultados mais palpáveis e a favor da segurança na temperatura ambiente e, em temperaturas de 300 °C e 400 °C, fornece resultados conservadores e antieconômicos (Tabela 4). No entanto, para temperaturas mais altas, 600 °C e 700 °C, os resultados não convergem em relação ao modelo numérico (Tabela 5).

Tabela 5 – Razão entre os resultados obtidos com as formulações e com o modelo numérico para as temperaturas de 600 °C e 700 °C.

		Delesques (1968)	Delesques (1969)	Gholizadeh (2011)	Vieira (2015)	Wang (2016)	Justino ¹ (2018)	
600 °C	Litzka	Média	1,01	0,99	1,34	1,04	1,01	
		Desvpad	0,26	0,26	0,77	0,10	0,15	0,06
		COV	26%	27%	58%	9%	12%	6%
		Máximo	1,64	1,64	1,96	1,20	1,45	1,09
		Mínimo	0,70	0,68	0,24	0,83	0,99	0,81
	Anglo-saxão	Média	0,86	0,83	1,38	0,97	0,92	1,00
		Desvpad	0,11	0,12	0,82	0,06	0,10	0,03
		COV	13%	14%	59%	7%	10%	3%
		Máximo	1,03	1,02	2,04	1,20	1,06	1,06
		Mínimo	0,67	0,64	0,22	0,93	0,75	0,95
	Peiner	Média	0,92	0,90	1,16	1,01	1,20	0,93
		Desvpad	0,19	0,19	0,79	0,11	0,12	0,05
		COV	20%	21%	69%	11%	10%	5%
		Máximo	1,34	1,34	1,90	1,21	1,44	1,01
		Mínimo	0,67	0,66	0,20	0,81	1,01	0,80
700 °C	Litzka	Média	0,93	0,91	3,03	1,10	1,15	1,00
		Desvpad	0,26	0,26	1,73	0,13	0,18	0,05
		COV	28%	29%	57%	12%	15%	5%
		Máximo	1,59	1,56	4,30	1,33	1,44	1,07
		Mínimo	0,65	0,63	0,14	0,84	0,90	0,82
	Anglo-saxão	Média	0,80	0,78	3,14	1,01	0,91	0,99
		Desvpad	0,13	0,13	1,81	0,06	0,09	0,02
		COV	16%	17%	58%	6%	10%	2%
		Máximo	1,01	1,01	4,46	1,21	1,09	1,04
		Mínimo	0,61	0,59	0,13	0,96	0,75	0,95
	Peiner	Média	0,85	0,83	2,77	1,07	1,13	0,92
		Desvpad	0,20	0,20	1,75	0,15	0,14	0,04
		COV	23%	24%	63%	14%	12%	5%
		Máximo	1,36	1,36	4,19	1,32	1,39	0,99
		Mínimo	0,62	0,60	0,12	0,84	0,93	0,80

¹ Justino (2018) corresponde ao modelo semiempírico apresentado no Artigo 2.

Fonte: A autora (2018).

A resposta da formulação desenvolvida por Gholizadeh, Pirmoz e Attarnejad (2011) se deve, principalmente, à forma como os autores delineiam a tensão crítica de flambagem (F_r) em regime elástico (Equação 1), que foi ajustada para um valor de módulo de elasticidade específico, a partir da equação da hipérbole de Euler (Equação 2).

$$F_r = \frac{105 \times 10^4}{\lambda^2} \quad (1)$$

$$F_r = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

em que: E é o módulo de elasticidade do aço e,

λ é a esbeltez do montante de alma, ou seja da barra submetida à compressão, por analogia ao modelo de biela.

Porém, somente essa mudança no valor do módulo de elasticidade ainda não é satisfatória, uma vez que os parâmetros da formulação foram ajustados por meio de redes neurais (GHOLIZADEH, PIRMOZ e ATTARNEJAD, 2011) e não por um meio analítico.

A formulação de Wang *et al.* (2016) fornece resultados satisfatórios para altas temperaturas, que são melhorados para os padrões Litzka e Peiner quando divididos por 1,2 (Tabela 6), como sugerem os autores.

Tabela 6 – Razão entre os resultados obtidos com a formulação ajustada de Wang *et al.* (2016) e com o modelo numérico.

Padrão		Temperatura da análise				
		20 °C	300 °C	400 °C	600 °C	700 °C
Litzka	Média	1,14	1,09	1,04	1,01	0,95
	Desvpad	0,09	0,11	0,12	0,13	0,15
	COV	8%	10%	12%	12%	15%
	Máximo	1,30	1,26	1,24	1,21	1,20
	Mínimo	0,90	0,91	0,85	0,82	0,75
Anglo-saxão	Média	0,72	0,76	0,76	0,77	0,76
	Desvpad	0,08	0,10	0,08	0,08	0,07
	COV	11%	13%	11%	10%	10%
	Máximo	0,87	0,93	0,89	0,89	0,91
	Mínimo	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Peiner	Média	1,08	1,05	1,02	1,00	0,94
	Desvpad	0,09	0,09	0,10	0,10	0,12
	COV	8%	8%	10%	10%	12%
	Máximo	1,22	1,20	1,22	1,20	1,16
	Mínimo	0,89	0,89	0,87	0,84	0,77

A “formulação ajustada” se refere à divisão dos resultados pelo coeficiente de ajuste 1,2.

Fonte: A autora (2018).

A formulação desenvolvida por Vieira (2015) fornece resultados satisfatórios para diferentes temperaturas, embora tenha sido desenvolvida para temperatura ambiente. Como esperado, a formulação proposta no Artigo 2 conduz a melhores resultados em situação de incêndio, visto que a mesma foi elaborada para atender a diferentes temperaturas de análise simultaneamente.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho realizou-se uma análise comparativa entre os resultados de força cortante resistente à flambagem do montante de alma por cisalhamento de vigas casteladas nos padrões Litzka, anglo-saxão e Peiner obtidos com formulações citadas na literatura técnica e obtidos com um modelo numérico de montante de alma validado com os experimentos de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998).

A análise foi estendida para a situação de incêndio, sendo as formulações e o modelo constitutivo do aço no modelo numérico alterados de forma a atender as proposições da norma ABNT NBR 14323:2013.

Ao se comparar os resultados obtidos em temperatura ambiente, nota-se que todas as formulações citadas conduzem a resultados próximos, inclusive dos resultados obtidos com o modelo numérico, confirmando a validade do mesmo.

Em situação de incêndio, a maioria das formulações não apresentou resultados satisfatórios, por terem sido desenvolvidas para a temperatura ambiente e não levarem em consideração a alteração das propriedades do aço. As formulações de melhor ajuste são a apresentada no Artigo 2, que foi desenvolvida para contemplar a situação de incêndio, a formulação de Vieira (2015) e de Wang *et al.* (2016), com ajustes no fator de segurança para os padrões Litzka e Peiner.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal de Viçosa pelo apoio para a realização e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

DELESQUES, R. Stabilité des montants de poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 3, p.26-33, 1968.

DELESQUES, R. Le calcul des poutres ajourées. **Construction Métallique**, v. 4, p. 41-51, 1969.

GALAMBOS, A. R.; HOSAIN, M. U.; SPEIRS, W. G. Optimum expansion ratio of castellated steel beams. **Engineering Optimization**, v. 1, p. 213-225, 1975.

GHOLIZADEH, S.; PIRMOZ, A.; ATTARNEJAD, R. Assessment of load carrying capacity of castellated steel beams by neural networks. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 770-779, 2011.

NADJAI, A.; PETROU, K.; HAN, S.; ALI, F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 579-588, 2016.

POURBEHI, P.; PIRMOZ, A. Shear response of castellated steel beams. **International Journal of Steel Structures**, v. 15, p. 389-399, 2015.

REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 1202-1207, 1998.

VIEIRA, W. B. **Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

WANG, P.; GUO, K.; LIU, M.; ZHANG, L. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 173-184, 2016.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability And Ductility Of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010.

3. CONCLUSÕES GERAIS

3.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de gerar uma formulação para se obter a capacidade resistente de vigas casteladas de aço quanto à flambagem do montante de alma por cisalhamento em situação de incêndio, desenvolveu-se um modelo numérico por meio do software ABAQUS, que foi validado com resultados experimentais presentes na literatura. Através desse modelo numérico foram obtidos dados para a geração de uma formulação semiempírica, tendo por base a analogia ao modelo de biela.

O modelo numérico foi validado em temperatura ambiente com os resultados experimentais de Vieira (2015) e de Redwood e Demirdjian (1998). Também validou-se a hipótese de distribuição homogênea de temperatura ao longo do perfil. Através do estudo de caso realizado, foi possível observar que, com o aumento da temperatura, além de haver a redução da resistência da viga, pode ocorrer um modo de colapso diferente do que ocorre em temperatura ambiente, como afirmam Wong, Burgess e Plank (2010), Wang P., Wang X. e Liu (2014) e Nadjai *et al.* (2016).

O estudo de caso realizado forneceu as diretrizes para a proposição de um modelo semiempírico baseado na formulação da norma ABNT NBR 14323:2013 para obtenção da capacidade resistente de barras submetidas a força axial de compressão, dada a analogia entre a diagonal comprimida do montante de alma e o modelo de biela.

Foi feito um estudo abrangendo toda a gama de vigas I laminadas de aço produzidas no Brasil e o modelo semiempírico desenvolvido se mostrou satisfatório para vigas com características geométricas distintas das usadas para o desenvolvimento da formulação, em temperatura ambiente e em situação de incêndio, com superestimativas de no máximo +10,5 % e subestimativas de no máximo -20,7 % em relação aos modelos numéricos.

Por fim, fez-se um estudo comparativo entre as formulações citadas na literatura e observou-se que, em temperatura ambiente, essas conduzem a resultados próximos, comprovando a eficácia da formulação desenvolvida e a validade do modelo numérico.

Em situação de incêndio, as formulações que se mostraram satisfatórias em altas temperaturas foram, além da formulação proposta nesse trabalho, as propostas por Vieira (2015) e por Wang *et al.* (2016).

3.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento desse trabalho, notou-se a importância de se realizar pesquisas mais aprofundadas sobre vigas casteladas de aço em situação de incêndio. Sugere-se, então, a abordagem de alguns aspectos em trabalhos futuros.

Recomenda-se que seja aprimorada a forma como é aplicada a imperfeição inicial no modelo numérico, uma vez que, embora o uso da análise de *Buckle* e a imperfeição de 1 % da altura da viga castelada tenham sido suficientes para delinear o fenômeno estudado, essa não representa a imperfeição inicial observada nos ensaios experimentais (cf. VIEIRA, 2015).

Nota-se ainda que, embora a validação dos modelos numéricos em temperatura ambiente para posterior análise em situação de incêndio venha sendo usada por diversos autores (VIMONSATIT, TAN e TING, 2007; CAMARGO *et al.*, 2010; CAMARGO *et al.*, 2011; WANG P., WANG X. e LIU, 2014) e foi também aplicada neste trabalho, sugere-se que sejam realizados ensaios em temperaturas elevadas para posterior validação de modelos numéricos, o que irá favorecer o estudo da distribuição de temperatura ao longo da viga e a verificação da validade da formulação proposta para perfis com distribuição não-uniforme de temperatura (vigas expostas em 3 faces).

Sugere-se, por fim, o estudo de vigas celulares, vigas casteladas mistas e também vigas casteladas com chapas expansoras em situação de incêndio, verificando a aplicabilidade do modelo proposto nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 66 p.

CAMARGO, A. L.; FAKURY, R. H.; CALDAS, R. B.; SILVA, A. L. R. C. Sobre a capacidade resistente à força cortante de painéis de alma de seções I em situação de incêndio considerando o efeito do campo de tração. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 6919-6930, 2010.

CAMARGO, A. L.; FAKURY, R. H.; CALDAS, R. B.; SILVA, A. L. R. C. Capacidade resistente à força cortante de perfis de alma senoidal em temperatura elevada. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 8, p. 38-52, 2011.

NADJAI, A.; PETROU, K.; HAN, S.; ALI, F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 579-588, 2016.

REDWOOD, R.; DEMIRDJIAN, S. Castellated beam web buckling in shear. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 1202-1207, 1998.

VIEIRA, W. B. **Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço**. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

VIMONSATIT, V.; TAN, K. H.; TING, S. K. Shear strength of plate girder web panel at elevated temperature. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 63, p. 1442-1451, 2007.

WANG, P.; WANG, X.; LIU, M. Practical method for calculating the buckling temperature of the web-post in a cellular steel beam in fire. **Thin-Walled Structures**, v. 85, p. 441-455, 2014.

WANG, P.; GUO, K.; LIU, M.; ZHANG, L. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 173-184, 2016.

WONG, V. B.; BURGESS, I.; PLANK, R. Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures. In: **SDSS' Rio 2010 – Stability And Ductility Of Steel Structures**. Rio de Janeiro, 2010.