

Capacidade resistente à força cortante de perfis de alma senoidal em temperatura elevada

Aline L. Camargo¹, Ricardo H. Fakury²,
Rodrigo B. Caldas³, Ana Lydia R. de Castro e Silva⁴

Resumo

Neste trabalho propõe-se um procedimento analítico simples para se determinar a força cortante resistente de perfis de alma senoidal em temperatura elevada, que consiste na utilização das equações da temperatura ambiente previstas pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, considerando a deterioração das propriedades mecânicas do material com o aquecimento causado por incêndio. Para a validação do procedimento, seus resultados são comparados com os de uma análise numérica via Método dos Elementos Finitos utilizando o programa computacional ABAQUS. Ao final, mostra-se que o procedimento conduz a bons resultados, desde que se adote um fator de redução da resistência ao escoamento do aço correspondente a 0,2% da deformação residual ou a 0,5% de deformação total conforme a curva tensão *versus* deformação da norma europeia EN 1993-1-2:2005.

Palavras-chave: Força cortante resistente. Dimensionamento em situação de incêndio. Perfis de alma senoidal. Método dos Elementos Finitos.

¹ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627. Escola de Engenharia – Bloco I. Pampulha, Belo Horizonte. 31270-901. BRASIL. Tel +55 31 3461 7197. E-mail: camargo_al@hotmail.com.

² Prof. Dr. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627. Escola de Engenharia – Bloco I. Pampulha, Belo Horizonte. 31270-901. BRASIL. Tel +55 31 3409-1972. E-mail: fakury@dees.ufmg.br.

³ Prof. Dr. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627. Escola de Engenharia – Bloco I. Pampulha, Belo Horizonte. 31270-901. BRASIL. Tel +55 31 3409-3589. E-mail: rbcaldas@gmail.com.

⁴ Profa. Dra. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627. Escola de Engenharia – Bloco I. Pampulha, Belo Horizonte. 31270-901. BRASIL. Tel +55 31 3409-1027. E-mail: analydiarcs@gmail.com (autor correspondente).

1 Introdução

Os perfis I constituídos por mesas de chapas planas grossas e alma de chapa fina com corrugação longitudinal de forma aproximadamente senoidal são denominados perfis de alma senoidal. Nesses perfis, a corrugação da alma aumenta consideravelmente sua rigidez e resistência às tensões de cisalhamento, reduzindo a possibilidade de flambagem local e facilitando o alcance da força cortante de plastificação (Pimenta, 2008).

No Brasil, os perfis de alma senoidal são produzidos nas dimensões mostradas na Figura 1. A alma possui espessura (t_w) de 2 mm ou 3 mm e aço USI CIVIL 300, que tem resistências ao escoamento (f_y) e à ruptura (f_u) de 300 MPa e 410 MPa, respectivamente. As mesas, por sua vez, possuem espessura (t_f) que se situa entre 4,75 mm e 19 mm e são fabricadas em aço USI CIVIL 350, com resistências ao escoamento e à ruptura de 350 MPa e 500 MPa, respectivamente.

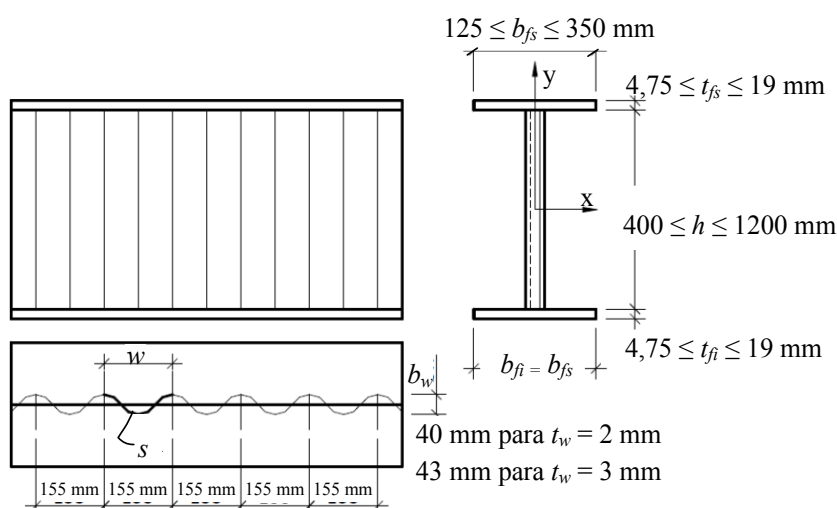


Figura 1: Dimensões do perfil de alma senoidal produzido no Brasil (PLAIS, 2005).

Este trabalho tem o objetivo de propor um procedimento analítico simples para se determinar a força cortante resistente de perfis de alma senoidal em temperatura elevada, conforme estudos de Camargo (2010).

O procedimento proposto usa o mesmo princípio adotado em Vimonsatit et al. (2007a) para perfis de alma plana, que consiste em empregar as mesmas equações da temperatura ambiente previstas pela norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, considerando apenas a deterioração das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura causado pelo incêndio. Para a validação do procedimento, seus resultados foram comparados com os de

uma análise numérica via Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa computacional ABAQUS (DESSAULT SYSTÈMES SIMULIA CORP, 2010).

2 Força cortante resistente

2.1 Temperatura ambiente

Segundo Plais (2005), em temperatura ambiente considera-se que a alma do perfil senoidal comporta-se como uma placa ortotrópica de rigidezes D_y e D_z , onde D_y é a rigidez de diafragma na direção do eixo central de inércia y da seção transversal e D_z a rigidez de diafragma na direção do eixo longitudinal z da viga, de valores:

$$D_y = \frac{E I_{wy}}{w} \quad (1)$$

$$D_z = \frac{E t_w^3 w}{12 s} \quad (2)$$

onde w é o comprimento de uma corrugação (Figura 1), igual a 155 mm, s é o perímetro de uma corrugação, igual a 177,2 mm e 178,6 mm, respectivamente para almas de espessuras de 2 mm e 3 mm, e I_{wy} é o momento de inércia de uma corrugação, obtido por integração numérica. Tem-se assim, para t_w de 2 mm, D_y e D_z iguais a 86030000 N.mm e 145780000 N.mm, respectivamente, e para t_w de 3 mm, iguais a 122500 N.mm e 1457800 N.mm.

Com os valores das rigidezes D_y e D_z , pode-se obter a tensão crítica elástica de flambagem por cisalhamento pela expressão:

$$\tau_{cr} = \frac{32,4}{t_w h^2} \sqrt[4]{D_z D_y^3} \quad (3)$$

Tendo-se o valor de τ_{cr} , obtém-se o índice de esbeltez reduzido por:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0,6 f_y}{\tau_{cr}}} \quad (4)$$

Finalmente, a força cortante resistente nominal da alma senoidal do perfil, V_{Rk} , pode ser obtida tendo como referência o valor de λ_0 em relação aos valores do parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação por cisalhamento (λ_p) e do parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento por cisalhamento (λ_r). Assim:

a) para $\lambda_0 \leq \lambda_p$, o colapso se dá por plastificação, e

$$V_{Rk} = V_{pl} \quad (5)$$

b) para $\lambda_p < \lambda_0 \leq \lambda_r$, o colapso se dá em regime inelástico, e

$$V_{Rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda_0} V_{pl} \quad (6)$$

c) para $\lambda_0 > \lambda_r$, o colapso se dá em regime elástico, e

$$V_{Rk} = \frac{1}{\lambda_0^2} V_{pl} \quad (7)$$

Nessas expressões, λ_p e λ_r são iguais a 0,89 e 1,12, respectivamente, e V_{pl} é a força cortante de plastificação da alma por cisalhamento, igual a:

$$V_{pl} = 0,6 A_w f_y \quad (8)$$

onde A_w é área da alma, calculada pelo produto entre sua altura (h) e sua espessura (t_w).

2.2 Procedimento analítico proposto para temperatura elevada

Em situação de incêndio, as propriedades do aço se deterioram com o aumento da temperatura. Dessa forma, a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade podem ser expressos como frações de seus valores em temperatura ambiente, ou seja:

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} f_y \quad (9)$$

$$E_\theta = k_{E,\theta} E \quad (10)$$

onde $k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$ são os fatores de redução da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade, respectivamente. Assim, considerando a Eq. (10) e as Eqs. (1) e (2), as rigidezes nas direções y e z em temperatura elevada passam a ser:

$$D_{y,\theta} = \frac{k_{E,\theta} E I_{wy}}{w} = k_{E,\theta} D_y \quad (11)$$

$$D_{z,\theta} = \frac{k_{E,\theta} E t_w^3 w}{12s} = k_{E,\theta} D_z \quad (12)$$

Com os novos valores de rigidez, $D_{y,\theta}$ e $D_{z,\theta}$, pode-se obter a tensão crítica elástica de flambagem por cisalhamento em temperatura elevada:

$$\tau_{cr,\theta} = \frac{32,4}{t_w h^2} \sqrt[4]{D_{z,\theta} D_{y,\theta}^3} = \frac{32,4 k_{E,\theta}}{t_w h^2} \sqrt[4]{D_z D_y^3} = k_{E,\theta} \tau_{cr} \quad (13)$$

com τ_{cr} dada pela Eq. (3). O índice de esbeltez reduzido em temperatura elevada, considerando a Eq. (9) e a Eq. (4), fica igual a:

$$\lambda_{0,\theta} = \sqrt{\frac{0,6 k_{y,\theta} f_y}{k_{E,\theta} \tau_{cr}}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (14)$$

Ao final, a força cortante resistente nominal da alma senoidal em temperatura elevada do perfil pode ser obtida da seguinte maneira:

a) para $\lambda_{0,\theta} \leq \lambda_p$, o colapso se dá por plastificação, e

$$V_{Rk,\theta} = V_{pl,\theta} \quad (15)$$

b) para $\lambda_p < \lambda_{0,\theta} \leq \lambda_r$, o colapso se dá em regime inelástico, e

$$V_{Rk,\theta} = \frac{\lambda_p}{\lambda_{0,\theta}} V_{pl,\theta} \quad (16)$$

c) para $\lambda_{0,\theta} > \lambda_r$, o colapso se dá em regime elástico, e

$$V_{Rk,\theta} = \frac{1}{\lambda_{0,\theta}^2} V_{pl,\theta} \quad (17)$$

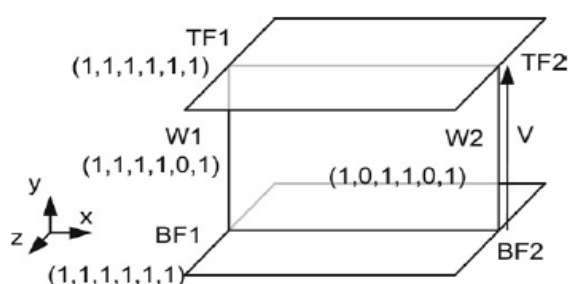
onde $V_{pl,\theta}$ é a força cortante de plastificação da alma em temperatura elevada, igual a:

$$V_{pl,\theta} = 0,6 k_{y,\theta} f_y A_w = k_{y,\theta} V_{pl} \quad (18)$$

3 Análise numérica via Mef

A análise numérica foi realizada em perfis de alma senoidal com alma de 2 mm de espessura. As alturas da alma foram de 400 mm, 800 mm e 1200 mm, com as mesas de 100 mm de largura por 8 mm de espessura, 200 mm de largura por 12,5 mm de espessura, e 300 mm de largura por 19 mm de espessura, respectivamente (a especificação dos perfis é PSS x altura da alma h x largura das mesas b_f x espessura das mesas t_f x espessura da alma t_w). A relação entre o comprimento longitudinal do perfil (comprimento do painel de alma) e a altura da alma (a/h) também foi estudada para valores iguais a 1, 2 e 3.

Na análise via Método dos Elementos Finitos utilizou-se o programa computacional ABAQUS (Dessault Systèmes Simulia Corp. 2010). Assim como em Vimonsatit et al. (2007a), a análise dos perfis foi realizada em condições isotérmicas de temperatura, em temperatura ambiente (20 °C), e, em temperaturas elevadas iguais a 400 °C, 550 °C e 700 °C. As condições de contorno, que simulam a existência de enrijecedores transversais nas extremidades transversais da alma, foram as mesmas utilizadas por Vimonsatit et al. (Figura 2), e o carregamento foi aplicado uniformemente distribuído ao longo de uma das extremidades da alma, perpendicular às mesas.



Legenda:

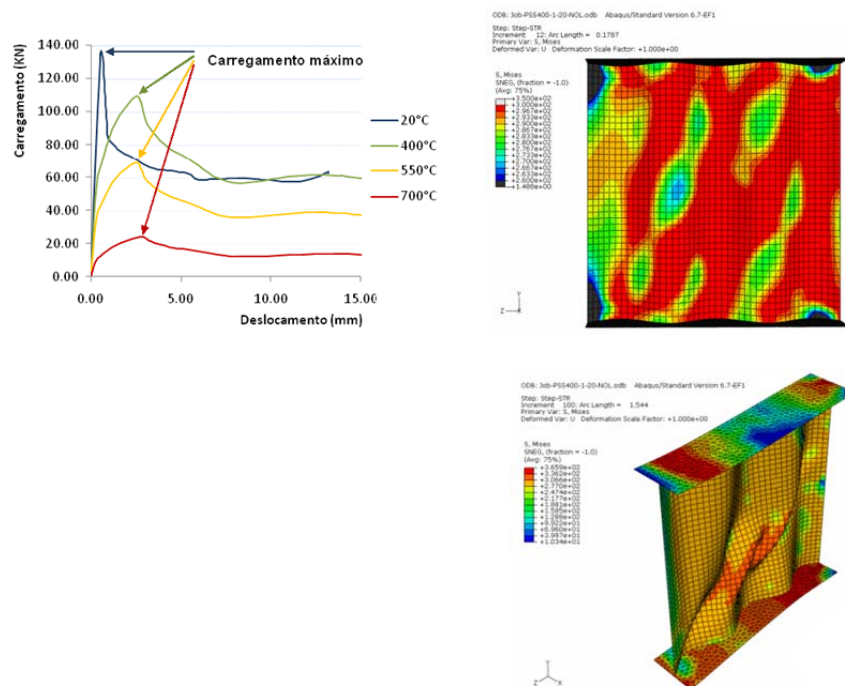
- translação na direção x, translação na direção y, translação na direção z, rotação em torno de x, rotação em torno de y, rotação em torno de z
- 1 = deslocamento impedido; 0 = deslocamento livre)

Figura 2: Condições de contorno (Vimonsatit et al. 2007a)

O modelo utilizado foi o mesmo validado em Camargo (2010). Na alma utilizaram-se elementos de casca do tipo S4R, com quatro nós com dupla curvatura e integração reduzida, e nas mesas elementos do tipo S3, triangular com três nós. A dimensão média dos elementos foi de 10°mm.

Em temperatura ambiente, a força cortante resistente foi definida como o valor máximo obtido da curva força *versus* deslocamento do modelo. Para as temperaturas elevadas, a análise foi realizada simulando-se o aquecimento dos perfis, por meio da degeneração das propriedades dos materiais, de acordo com a curva tensão *versus* deformação do EN 1993-1-2:2005. O colapso foi definido, como à temperatura ambiente, como força máxima obtida da curva força *versus* deslocamento do modelo.

A Figura 3 ilustra o processamento, tomando um perfil com altura de alma de 400 mm, largura e espessura das mesas de 100 mm e 12,5 mm, respectivamente, e espessura da alma de 2 mm (PSS 400 x 100 x 12,5 x 2) e relação a/h do painel de alma igual a 1,0.



a) curva força *versus* deslocamento

b) força máxima

c) perfil no fim da análise

Figura 3: Análise numérica do perfil PSS 400 x 100 x 12,5 x 2 com a/h do painel igual a 1,0.

Através dos resultados obtidos numericamente para a capacidade resistente última dos perfis à força cortante, mostrados na Tabela 1, observa-se que a relação a/h não apresentou influência significativa na resistência do perfil, provavelmente devido à sua corrugação senoidal.

Tabela 1: Força cortante resistente obtida via MEF

Perfil	Temperatura (°C)	V_{Rk} (kN)		
		$a/h = 1$	$a/h = 2$	$a/h = 3$
PSS400	20	136,46	136,24	133,92
	400	109,58	107,80	107,47
	550	68,83	67,68	67,68
	700	24,02	23,50	23,55
PSS800	20	266,15	264,43	264,76
	400	198,40	195,11	196,14
	550	124,52	123,39	123,55
	700	43,10	42,62	42,65
PSS1200	20	405,84	411,19	405,53
	400	296,86	296,54	288,70
	550	187,10	186,85	183,63
	700	63,71	63,45	62,62

Foi efetuada uma simulação adicional para verificar se uma alteração nas dimensões das mesas, que poderia, por exemplo, modificar a rigidez das ligações entre esses elementos e a alma, afetaria os resultados da força cortante resistente. Dessa forma foi realizada uma análise

numérica do perfil PSS 400 x 150 x 8 x 2, igual ao perfil PSS 400 x 100 x 8 x 2, porém, com as mesas com largura igual a 150 mm, portanto, com área 50% maior. A Figura 4 apresenta os resultados dessa comparação, feita para relações a/h iguais a 1, 2, 3 e nota-se mais uma vez que na faixa estudada, a/h praticamente não influi nos resultados.

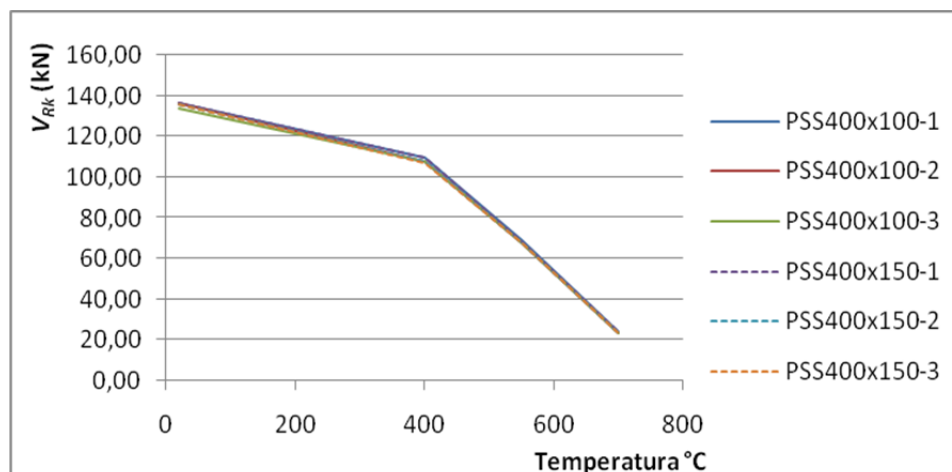


Figura 4: Força cortante resistente dos perfis PSS 400 x 100 x 8 x 2 e PSS 400 x 150 x 8 x 2.

4 Comparação entre os resultados analítico e numérico

Com a formulação para o cálculo da capacidade resistente à força cortante em temperatura ambiente, apresentada no subitem 2.1, e a proposta neste trabalho, apresentada no subitem 2.2 para temperatura elevada, efetuaram-se todos os cálculos analíticos para os perfis analisados sob as temperaturas de 20 °C, 400 °C, 550 °C e 700 °C. Numa primeira análise foram considerados os fatores de redução da resistência ao escoamento ($k_{y,\theta}$) para a deformação total de 2% e do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) apresentados pela ABNT NBR 14323:1999 e pelo EN 1993-1-2:2005. Esses resultados foram então comparados com os resultados obtidos via MEF, conforme se vê na Tabela 2, para o perfil PSS 400 e a/h igual a 1,0.

Tabela 2: Relação entre os resultados analítico ($V_{Rk,A}$) e numérico ($V_{Rk,N}$) para PSS 400 e $a/h = 1$.

Temperatura (°C)	$V_{Rk,A}$ (kN)	$V_{Rk,N}$ (kN)	$\frac{V_{Rk,N}}{V_{Rk,A}}$
20	144,00	136,46	0,948
400	144,00	109,58	0,761
550	90,00	68,83	0,765
700	33,12	24,02	0,725

Depois dessa primeira análise percebeu-se que os fatores de redução propostos, para a deformação total de 2%, não atendiam ao perfil estudado, pois os resultados para temperaturas elevadas foram insatisfatórios, com uma diferença média entre o analítico e o numérico de 25%. Assim, optou-se por encontrar uma nova referência para se chegar a valores dos fatores de redução do aço em temperatura elevada que conduzissem aos resultados numéricos e que mantivessem a simplicidade do modelo analítico.

No caso do perfil PSS 400, observou-se que o colapso ocorreu em regime plástico, o que significa, com base nas Eqs. (8) e (18), que a única grandeza que se altera no cálculo da força cortante resistente com a elevação da temperatura é o $k_{y,\theta}$. Assim, foram obtidos fatores que, multiplicados pela força resistente analítica $V_{Rk,A}$ a 20 °C, levaram aproximadamente aos valores numéricos $V_{Rk,N}$ a 400 °C, 550 °C e 700 °C. Esses novos fatores podem ser considerados os mais adequados redutores da resistência ao escoamento, no lugar dos anteriormente utilizados. Na sequência observou-se que a deformação total de 0,5% da curva do EN 1993-1-2:2005 corresponde a esses novos fatores. Com base nessa deformação, foram tomados os valores correspondentes para os fatores de redução ($k_{y,\theta,0,5\%}$) e refeitos os cálculos para obtenção da força cortante resistente analítica, agora simbolizada por $V_{Rk,A,0,5\%}$. O processo e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Obtenção dos fatores de redução da resistência ao escoamento para o perfil PSS 400.

Temperatura (°C)	$V_{Rk,A}$ (kN)	$V_{Rk,N}$ (kN)	$\frac{V_{Rk,N}}{V_{Rk,A}}$	Deformação equivalente	Deformação média	$k_{y,\theta,0,5\%}$	$V_{Rk,A,0,5\%}$ (kN)	$\frac{V_{Rk,A,0,5\%}}{V_{Rk,N}}$
20	440		-	-		0,0	144,00	1,06
400		0,958	0,761	0,00493	0,005	0,76	110,02	1,00
550		0,83	0,478	0,00485	0,005	0,48	69,26	1,01
700		0,42	0,167	0,00515	0,0065	0,16	23,76	0,99

Confirmando a consistência dos resultados obtidos, segundo Vimonsatit et al. (2007b), a BS 5950-8:1990 indica que, para elementos suscetíveis à flambagem, ou seja, elementos esbeltos, seja usado o fator de redução da resistência ao escoamento a 0,5% da deformação total.

Na etapa final, os cálculos foram efetuados novamente, incluindo os demais perfis tratados neste trabalho (PSS 800 e PSS 1200), utilizando os fatores de redução da resistência ao escoamento a 0,5% de deformação total com base na curva tensão *versus* deformação do EN 1993-1-2:2005. Adicionalmente, foram feitos também os mesmos cálculos adotando os fatores de redução da resistência ao escoamento do aço a 0,2% de deformação residual ($V_{Rk,A,0,2\%}$), fornecidos no anexo E do EN 1993-1-2:2005 para seções de classe 4 (seções com elementos esbeltos). Os resultados então foram comparados com aqueles obtidos numericamente com o programa ABAQUS (Dessault Systèmes Simulia Corp. 2010) e estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados para fatores de redução a 0,2% (residual) e 0,5% (total) de deformação.

Perfil	Temperatura (°C)	$V_{Rk,A,0,5\%}$ (kN)	$V_{Rk,A,0,2\%}$ (kN)	$V_{Rk,N}$ (kN)	$\frac{V_{Rk,A,0,5\%}}{V_{Rk,N}}$	$\frac{V_{Rk,A,0,2\%}}{V_{Rk,N}}$
PSS 400	20	144,00	144,00	136,46	1,06	1,06
	40	110,0		109,5	1,0	0,8
	0	2	93,60	8	0	5
	55	69,26	59,76	68,83	1,0	0,8
	0				1	7
	70	23,76	18,72	24,02	0,9	0,7
PSS 800	0				9	8
	20	288,00	288,00	266,15	1,08	1,08
	40	220,0	187,2	198,4	1,1	0,9
	0	3	0	0	1	4
	55	138,5	119,5	124,5	1,1	0,9
	0	3	2	2	1	6
PSS 1200	70	47,52	37,44	43,10	1,1	0,8
	0				0	7
	20	392,94	392,94	405,84	0,97	0,97
	40	287,3	265,0	296,8	0,9	0,8
	0	6	5	6	7	9
	55	183,8	170,7	187,1	0,9	0,9
	0	2	5	0	8	1
	70	57,55	51,08	63,71	0,9	0,8
	0				0	0

Observando-se os resultados da Tabela 4, pode-se concluir que, de modo simples e conservador, até que outros estudos sejam feitos, especialmente experimentais, é conveniente adotar um fator de redução a 0,2% de deformação residual com base na curva tensão *versus* deformação do EN 1993-1-2: 2005. Fica claro também que o uso de um fator de redução a 0,5% de deformação total representa bem o comportamento do perfil de alma senoidal, com uma

diferença máxima de 11%, diferença esta compatível com a encontrada em temperatura ambiente, que foi de 8%.

5 Conclusões

O procedimento analítico usado para se obter a força cortante resistente de perfis de alma senoidal em temperatura ambiente, apresentado no subitem 2.1, mostrou-se adequado em comparação com os resultados numéricos. Verificou-se que a relação entre o comprimento do painel e sua altura (a/h) não apresentou influência significativa nos resultados, e comprovou-se que as dimensões das mesas, desprezadas no procedimento analítico proposto, não interferem nos resultados.

Em situação de incêndio, foi mostrado que o uso de um procedimento de cálculo analítico para determinação da força cortante resistente similar ao empregado para temperatura ambiente, apenas reduzindo-se as propriedades mecânicas do aço em função da elevação da temperatura, mostrado no subitem 2.2, conduz a bons resultados. No entanto, para que se tenha uma margem de segurança até que estudos complementares, especialmente experimentais, sejam efetuados, é recomendável a adoção de um fator de redução da resistência ao escoamento do aço correspondente a 0,2% da deformação residual, fornecido no anexo E do EN 1993-1-2:2005. Observou-se também que o uso de um fator de redução a 0,5% de deformação total, obtido com base na curva tensão *versus* deformação do EN 1993-1-2:2005, representa bem o comportamento do perfil de alma senoidal.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, que tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Referências

ABNT NBR 14323:1999. Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

ABNT NBR 8800:2008. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

BS 5950-8:1990. Structural Use of Steelwork in Buildings. In: Code of Practice for Design Fire Resistance Design, British Standards Institution, London.

CAMARGO, A. L. (2010). Determinação da Capacidade Resistente à Força Cortante de Perfis de Alma Senoidal em Situação de Incêndio. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais.

Dessault Systèmes Simulia Corp. (2010). Software ABAQUS/CAE, versão 6.10.

EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels.

PIMENTA, R. J. (2008). Perfis de Alma Senoidal: Proposição de Método de Cálculo e Análise de Confiabilidade Estrutural. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade de Federal de Minas Gerais.

PLAIS, W. (2005). Perfis de Alma Senoidal - Versão 1.0. Codeme Engenharia S.A., Betim, Brasil.

VIMONSATIT, V., TAN, KH. and Ting, SK. (2007a). Shear Strength of Plate Girder Web Panel at Elevated Temperature. Journal of Constructional Steel Research, v. 63, p. 1442-1451.

VIMONSATIT, V., TAN, KH and Ting, SK. (2007b) Testing of Plate Girder Web Panel Loaded in Shear at Elevated Temperature. Journal of Structural Engineering, p. 815-824.

Shear strength of sinusoidal-web girders at elevated temperature

Abstract

This paper proposes a simple analytical procedure to determine the shear strength of sinusoidal-web girders at elevated temperature. This procedure involves the use of room temperature equations of the Brazilian Standard ABNT NBR 8800:2008, considering the deterioration of mechanical properties with the heating caused by fire. To validate the procedure, its results are compared with those of a numerical analysis via Finite Element Method using the computer program ABAQUS. In the end, it is shown that the procedure leads to good results, but it is necessary the use of a reduction factor for yield strength of steel corresponding to 0.2% of residual strain or 0.5% of total strain according to stress-strain relationship from European Standard EN 1993-1-2:2005.

Keywords: Shear strength. Sinusoidal-web girder. Finite Element Method. Elevated temperature.

Introduction

A sinusoidal-web girder is a built-up I-girder with a thin-walled corrugated web (with a sinusoidal profile) and flat plate flanges. At room temperature, the presence of corrugations increases the shear strength of the web, avoiding failure of the girder due to loss of stability before the plastic limit-loading for the web is reached.

This paper proposes a simple analytical procedure to determine the shear strength of sinusoidal-web girders at elevated temperature, according to studies by Camargo (2010).

Shear strength

Room temperature

The design of sinusoidal-web girder for pure shear at room temperature is presented in Plais (2005).

Elevated temperature

For elevated temperature, it was followed the same principle used in Vimonsatit *et al.* (2007a) for plate girder web panels. The equations for room temperature were expanded to elevated temperature considering the material properties deterioration at elevated temperature. For steel material, the yield strength and the elastic modulus can be expressed as fraction of their values at room temperature.

Numerical analysis

The computational program ABAQUS (Dessault Systèmes Simulia Corp. 2010) was used in the FE analysis. Models with quadrangular shell elements, of the type S4R were used in the web, and triangular S3 were used in the flanges. The mean dimension of the elements was 10 mm as in Camargo (2010). The material properties followed the EN 1993-1-2:2005 (2005) stress-strain relationship and the geometrical non-linearity was also considered with an incremental analysis. Isothermal conditions at room temperature, 400°C, 550°C and 700°C were considered, as in Vimonsatit et al. (2007a). For room temperature the load was applied until the collapse of the panel; and at elevated temperature, the temperature was increased through the degeneration of the material properties and then the load was applied until the collapse. The collapse of the panel was defined as the increment from which the panel could not support any additional increase of load.

Analytical and numerical results

Three profiles were studied. For all of them the web was 2 mm thick. The height was 400 mm, 800 mm e 1200 mm, and the flanges were 100 mm wide for 8 mm thick, 200 mm wide for 12.5 mm thick, and 300 mm wide for 19 mm thick respectively. The ratio length by height (a/h) was also studied with a variation of 1, 2 and 3.

The numerical analysis with the EN 1993-1-2:2005 (2005) stress-strain relationship was able to simulate the behavior of slender elements, in this case the sinusoidal web. However, it was observed that should be adopted a reduction factor for yield strength of steel corresponding to 0.2% of residual strain or 0.5% of total strain according to stress-strain relationship from European Standard EN 1993-1-2:2005. This factor is close to the one recommended by the British Standard BS 5950-Part 8:1990 (1990), used by Vimonsatit *et al.* (2007b) for slender plane plate girders, and is also similar to the factor for class 4 sections of the EN 1993-1-2:2005.

Conclusions

The analytical procedure to obtain the shear resistant strength of sinusoidal web profiles at room temperature, shown in Plais (2005) and presented in subsection 2.1 of this paper, was adequate in comparison with numerical results. It was found that the relationship length *versus* height of web panel (a/h) can be neglected and proved that the dimensions of the flanges (not considered in the analysis) does not influence the results.

In fire situation, it was shown that the use of an analytical procedure for the determination of shear strength, that is similar to the procedure for room temperature but reducing the mechanical properties of steel as a function of temperature rise, seen in subsection 2.2, leads to good results. However, in order to have a margin of safety until additional studies are made, it is recommended the adoption of a reduction factor of yield strength of steel corresponding to 0.2% of residual strain, according to stress-strain relationship from European Standard EN 1993-1-2:2005. It was also observed that the use of a reduction factor corresponding to 0.5% of total strain represents adequately the behavior of the sinusoidal-web girder.