

## **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**

**Aline L. Camargo<sup>a</sup>, Ricardo H. Fakury<sup>a</sup>,  
Rodrigo B. Caldas<sup>a</sup> e Ana Lydia R. de Castro e Silva<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 - Bloco 1 - 4o andar, sala 4215, Campus Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brasil, camargo\_al@hotmail.com, fakury@dees.ufmg.br, caldas@dees.ufmg.br, lydia@dees.ufmg.br.com, <http://www.pos.dees.ufmg.br/>*

**Palavras Chave:** Capacidade resistente à força cortante, Efeito do campo de tração, Dimensionamento em situação de incêndio, Estruturas de aço.

**Resumo:** Neste trabalho é proposto um procedimento analítico para determinação da força cortante resistente nominal de painéis de alma de vigas de aço em seção I em situação de incêndio, considerando o efeito do campo de tração. Para isso, foi desenvolvida e aferida uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, para análise não-linear geométrica e de material, usando o programa comercial ABAQUS, considerando na alma condições isotérmicas com temperatura de até 700°C. O procedimento analítico, de fácil utilização prática, adota formulação similar à da norma estadunidense ANSI/AISC 360-05 para projeto à temperatura ambiente, tomando-se os valores da resistência ao escoamento e do módulo de elasticidade do aço à temperatura elevada.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Generalidades

O comportamento da alma de vigas em seção I sob ação de força cortante, em temperatura ambiente, é bem conhecido. Em linhas gerais, o modo de colapso depende da razão entre a altura ( $h$ ) e a espessura ( $t_w$ ) da alma. Se essa razão for inferior a um determinado limite,  $\lambda_p$ , denominado parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação, a falha se dá por escoamento causado pelas tensões de cisalhamento e, se superar esse limite, por flambagem também evidentemente causada pelas tensões de cisalhamento. Quando ocorre flambagem, o fenômeno pode se dar em regime elástico ou inelástico: se a razão  $h/t_w$  for superior a um outro limite,  $\lambda_r$ , denominado parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento, a flambagem é elástica e, em caso contrário, inelástica.

Os estudos da questão da flambagem da alma por força cortante, já existentes há décadas, como mostra por exemplo McGuire (1968), demonstram que, sob determinadas condições, o início do fenômeno não significa necessariamente colapso. Isso porque se a viga possui enrijecedores transversais, quando a flambagem começa, os painéis de alma entre os enrijecedores desenvolvem o chamado efeito do campo de tração (surtem significativas tensões de tração em uma direção diagonal nos painéis), que faz com que adquiram uma capacidade resistente adicional (resistência pós-flambagem). O valor da capacidade resistente adicional é fortemente influenciado pela razão entre o comprimento dos painéis e a altura da alma (quanto menor essa razão, maior a capacidade resistente adicional).

Mais recentemente, Vimonsatit *et al.* (2007a,b) trataram novamente do fenômeno da resistência pós-flambagem e voltaram a mostrar que após o início da flambagem, há a formação de um campo de tração diagonal no painel de alma e o colapso só ocorre quando as mesas desenvolvem rótulas plásticas. Em outras palavras, a força cortante total suportada pelo painel é a soma entre aquela que causa o início da flambagem (Figura 1-a) e a força adicional suportada pelo efeito do campo de tração na alma (Figura 1-b – notar a tensão de tração  $\sigma_t$  causada pelo efeito do campo de tração), cujo valor final só é atingido quando se forma o mecanismo plástico de colapso nas mesas (Figura 1-c).

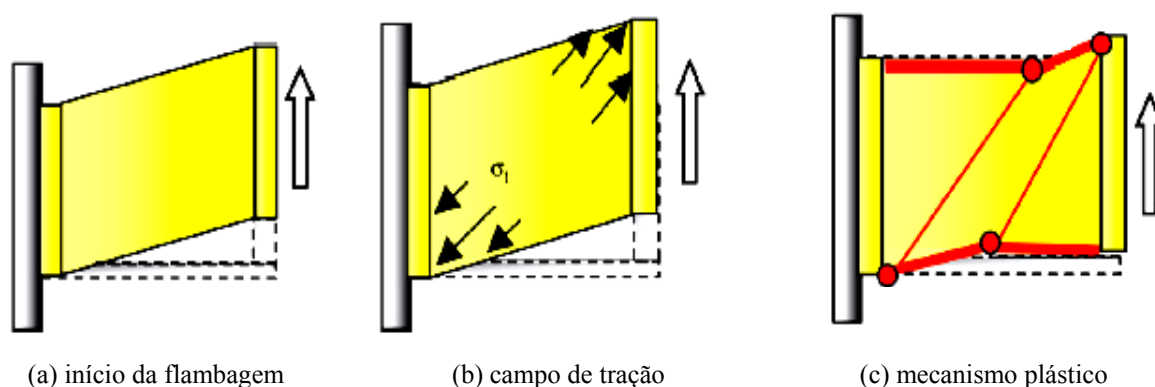


Figura 1: Comportamento da alma sob força cortante até o colapso (adaptada de Vimonsatit *et al.*, 2007)

Para determinação da força cortante resistente sob temperatura elevada, Vimonsatit *et al.* (2007a) propuseram utilizar a mesma formulação da temperatura ambiente, levando-se em conta o efeito do campo tração, com ajustes para incorporar a degradação das propriedades mecânicas dos materiais. Nesse procedimento, o efeito do campo de tração é equacionado de

modo bastante preciso, considerando todos os parâmetros que influem no fenômeno, incluindo o ângulo de inclinação da diagonal de tração formada, de determinação complexa. Os resultados obtidos analiticamente foram então comparados com resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e por ensaios. Um fato interessante, que merece ser mencionado, é que Vimonsatit *et al.* (2007a,b) apenas trataram, de forma mais completa, envolvendo ensaios, de painéis com razão entre o comprimento e a altura da alma igual a 1,0, situação em que o efeito do campo de tração é bastante pronunciado.

## 1.2 Sobre este Trabalho

Neste trabalho é proposto um procedimento para determinação da força cortante resistente nominal de painéis de alma de vigas de aço com seção I, considerando o efeito do campo de tração, em situação de incêndio. Esse procedimento, de fácil utilização prática, consiste da adoção da mesma formulação da ANSI/AISC 360-05 para temperatura ambiente, apenas corrigindo-se a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade do aço por meio dos fatores de redução adequados.

Para se chegar ao procedimento proposto, inicialmente foi desenvolvida e aferida, com base em resultados de Vimonsatit *et al.* (2007a,b), uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, para análise não-linear, prevendo comportamentos elástico e inelástico, usando o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998), de forma similar a Camargo (2010). Posteriormente, foram processados painéis com relações entre comprimento e altura da alma variando entre 1 e 4, abrangendo-se toda a faixa em que se permite utilizar o efeito do campo de tração e ainda ultrapassando ligeiramente tal faixa.

## 2 DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA FORÇA CORTANTE RESISTENTE

### 2.1 Generalidades

Conforme exposto em 1.1, no procedimento analítico para determinação da força cortante resistente em temperatura elevada, Vimonsatit *et al.* (2007a) utilizaram uma formulação bastante precisa desenvolvida originalmente para temperatura ambiente, pela qual é necessário determinar o ângulo de inclinação do campo de tração, com ajustes para incorporar a degradação das propriedades mecânica dos materiais com o aumento da temperatura. No entanto, no presente trabalho, como descrito em 1.2, propõe-se substituir a citada formulação por outra, mais simples e de uso mais prático, prescrita pelo ANSI/AISC 360-05 para a consideração do efeito do campo de tração, que dispensa a determinação do ângulo de inclinação, reproduzida no subitem 2.2.

### 2.2 Temperatura Ambiente

De acordo com o ANSI/AISC 360-05, a força cortante resistente nominal da alma, submetida a cisalhamento, pode ser determinada considerando o efeito do campo de tração se a viga possuir enrijecedores transversais, exceto para:

- painéis de extremidade e painéis nos quais a razão entre o comprimento livre  $a$  e a altura da alma  $h$  exceda a 3,0 ou a  $[260/(h/t_w)]^2$ ; onde  $t_w$  é a espessura da alma;
- vigas em que

$$\frac{2A_w}{A_{fc} + A_{ft}} > 2,5 \quad (1)$$

ou

$$\frac{h}{b_{fc}} > 6,0 \quad (2)$$

ou

$$\frac{h}{b_{ft}} > 6,0 \quad (3)$$

onde  $A_w$ ,  $A_{fc}$  e  $A_{ft}$  são respectivamente as áreas da alma, da mesa comprimida e da mesa tracionada e  $b_{fc}$  e  $b_{ft}$  são respectivamente a largura das mesas comprimida e tracionada.

Quando é permitida a consideração do efeito do campo de tração, a força cortante resistente nominal,  $V_{Rk}$ , é dada por:

(a) para  $\lambda = h/t_w \leq \lambda_p$ , ou seja, quando o colapso da alma se dá por escoamento

$$V_{Rk} = 0,60 A_w f_y \quad (4)$$

(b) para  $\lambda = h/t_w > \lambda_p$ , ou seja, quando o colapso da alma se dá por flambagem

$$V_{Rk} = 0,60 A_w f_y \left( C_v + \frac{1 - C_v}{1,15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad (5)$$

com

$$\lambda_p = 1,10 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (6)$$

$$\lambda_r = 1,37 \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (7)$$

onde  $E$  e  $f_y$  são respectivamente o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do aço e  $k_v$  é o coeficiente de flambagem por cisalhamento do painel de alma, igual a

$$k_v = 5 + \frac{5}{(a/h)^2} \quad (8)$$

Na Eq. (5),  $C_v$  é o coeficiente de cisalhamento da alma, cujo valor depende da esbelteza  $\lambda$  desse elemento, conforme segue:

- se  $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ , ou seja, quando a flambagem da alma ocorre em regime inelástico, tem-se:

$$C_v = \frac{\lambda_p}{\lambda} \quad (9)$$

- se  $\lambda > \lambda_r$ , ou seja, quando a flambagem da alma ocorre em regime elástico, tem-se:

$$C_v = \frac{\lambda_p \lambda_r}{\lambda^2} \quad (10)$$

Destaca-se que a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 adota o mesmo procedimento do ANSI/AISC 360-05, mas não prevê a consideração, em nenhuma circunstância, do efeito do campo de tração. Isso significa que a Eq. (5) passa a ser expressa por:

$$V_{Rk} = 0,60 A_w f_y C_v \quad (11)$$

### 2.3 Temperatura Elevada

Em situação de incêndio as propriedades do aço se deterioram com o aumento da temperatura. Seus valores de resistência ao escoamento e módulo de elasticidade podem ser expressos respectivamente como:

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} f_y \quad (12)$$

$$E_\theta = k_{E,\theta} E \quad (13)$$

onde  $k_{y,\theta}$  e  $E_\theta$  são os fatores de redução das duas propriedades sob altas temperaturas.

Neste trabalho, a exemplo de Vimonsatit *et al.* (2007a), propõe-se utilizar a mesma formulação da temperatura ambiente, no caso a formulação apresentada em 2.2, apenas substituindo-se  $f_y$  por  $f_{y,\theta}$  e  $E$  por  $E_\theta$ .

## 3 SIMULAÇÃO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

### 3.1 Generalidades

O programa computacional ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998) foi utilizado neste trabalho para a análise estrutural não-linear geométrica e de material. Ele utiliza um processo incremental e iterativo para solucionar problemas não-lineares. Para isso, emprega o método *Riks* modificado, que permite obter estados de equilíbrio estático durante uma fase instável de resposta da estrutura, e é usado para o caso em que o carregamento é proporcional. A consideração da não-linearidade do material é feita pela adoção de um diagrama tensão *versus* deformação que represente adequadamente o comportamento do aço.

Na montagem da geometria do modelo, as partes foram construídas com elementos de casca, que são adequados para a análise das estruturas em que uma dimensão (a espessura) é significativamente menor que as outras duas, e quando as tensões na direção da espessura são desprezíveis. Aos elementos foram atribuídas suas propriedades, tais como espessura e material. O modelo foi submetido a condições de contorno pré-definidas e a um carregamento inicial. Por fim, discretizou-se a malha a ser trabalhada.

A primeira fase da análise consistiu da simulação dos modos de flambagem por cisalhamento da alma do perfil pelo método *buckle* (solução de um problema de autovalor e autovetor). Ao final dessa fase, foi isolado o modo de flambagem mais adequado e o seu autovalor. Na segunda fase, utilizou-se o método *Riks* modificado, no qual adicionou-se ao modelo uma pequena imperfeição inicial na geometria, utilizando como base o modo de flambagem determinado na fase anterior. Dessa forma, no final do processo foram consideradas as não-linearidades de material e de geometria e, como resultado, foi obtida a sua carga última, decorrente de flambagem ou falha do material.

### 3.2 Definição e Aferição da Modelagem Numérica

Para aferição da modelagem numérica desenvolvida neste trabalho, foi escolhido um modelo já anteriormente processado numericamente pelo MEF por Vimonsatit *et al.* (2007b), em relação ao qual esses autores apresentam ainda resultados de ensaios. Esse modelo é constituído por um perfil I com as seguintes características:

- alma de altura ( $h$ ) e espessura ( $t_w$ ) iguais a 305 mm e 2 mm, respectivamente, módulo de elasticidade ( $E_w$ ) igual a 200000 MPa e resistência ao escoamento ( $f_{yw}$ ) igual a 287,8 MPa;

- mesas de largura ( $b_f$ ) e espessura ( $t_f$ ) iguais a 80 mm e 6 mm, respectivamente, módulo de elasticidade ( $E_f$ ) igual a 204000 MPa e resistência ao escoamento ( $f_{yf}$ ) igual a 274,5 MPa;
- comprimento ( $a$ ) de 305 mm, portanto igual à altura da alma, caracterizando uma situação de  $a/h$  igual a 1,0.

Em Vimonsatit *et al.* (2007a,b), as análises foram feitas à temperatura ambiente (20°C) e também nas temperaturas elevadas de 400°C, 550°C e 700°C, por meio do programa MSC (2001), usando elementos de casca tridimensionais quadráticos de 8 nós para modelagem da alma e mesas. As condições de contorno empregadas, que simulavam a presença de enrijecedores transversais nas extremidades, e o ponto de atuação da força cortante são mostrados na Figura 2, onde o número 0 indica deslocamento ou rotação liberado e o número 1 deslocamento ou rotação impedido.

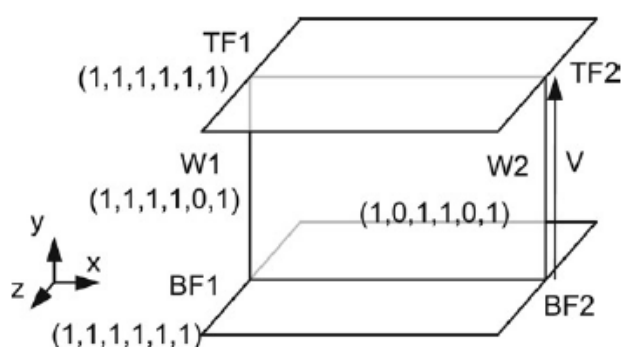


Figura 2: Condições de contorno utilizadas por Vimonsatit *et al.* (2007a)

Neste trabalho, via programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998), com as propriedades do perfil e as condições de contorno usadas Vimonsatit *et al.* (2007a,b), procurou-se reproduzir os mesmos resultados desses autores. Foram utilizados elementos de casca formando uma malha de 10 mm em média, do tipo S8R, ou seja, quadriláteros estruturados com 8 nós de dupla curvatura e integração reduzida (ver Figura 3). O carregamento foi aplicado uniformemente distribuído ao longo da extremidade da alma, perpendicular às mesas. Na análise em temperatura ambiente, assim como em Vimonsatit *et al.* (2007a), a força cortante foi aplicada até o painel não suportar mais aumento de carregamento. Para as temperaturas elevadas, primeiro simulou-se o aquecimento do perfil, por meio da degeneração das propriedades dos materiais, e em seguida aplicou-se o carregamento até o colapso.

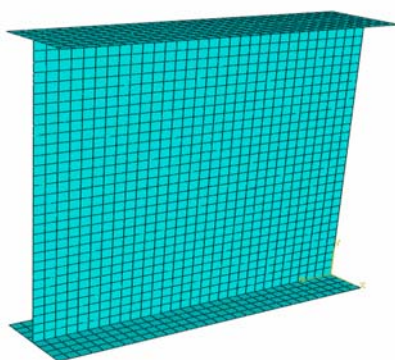


Figura 3: Malha usada no processamento numérico via programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998)

Vimonsatit *et al.* (2007b) adotaram na análise numérica um modelo bi-linear elástico perfeitamente plástico para a relação tensão *versus* deformação do aço, usando os fatores de redução  $k_{y,\theta}$  da resistência ao escoamento do aço em temperatura elevada fornecidos pela norma britânica BS 5950-8:1990. Esses fatores, seguindo a recomendação dessa norma, foram tomados para deformação total de 0,5%, com base na premissa de as almas serem suscetíveis à flambagem. Neste trabalho, foi seguida essa mesma orientação quanto aos fatores  $k_{y,\theta}$ , apenas tomando-se o fator de redução do módulo de elasticidade,  $k_{E,\theta}$ , conforme o EN 1993-1-2:2005 e a ABNT NBR 14323:1999 (Figura 4), uma vez que a norma britânica não fornece esses fatores e que Vimonsatit *et al.* (2007a,b) não explicitam que valores eles adotam em seus processamentos.

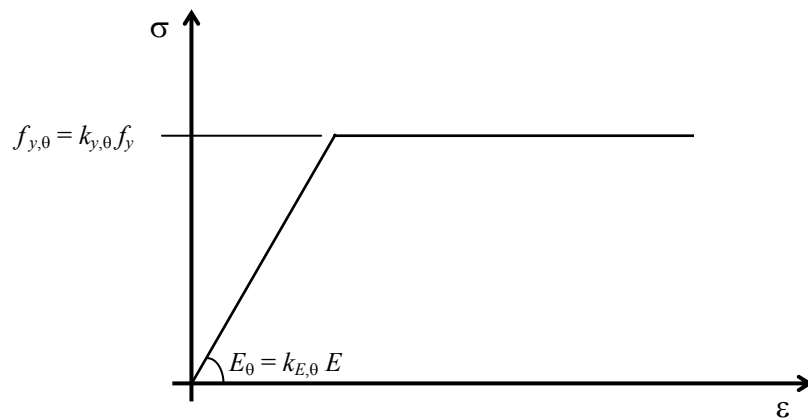


Figura 4: Relação tensão *versus* deformação do aço

Foi realizada a primeira fase da análise e obtido o modo de flambagem desejado e o autovalor correspondente do modelo. Com base nesses dados, e introduzindo uma imperfeição inicial da ordem de um milésimo da altura da alma, efetuou-se a segunda fase da análise que permitiu a visualização do modo de colapso do painel de alma e a obtenção da sua capacidade resistente última à força cortante (Figura 5).

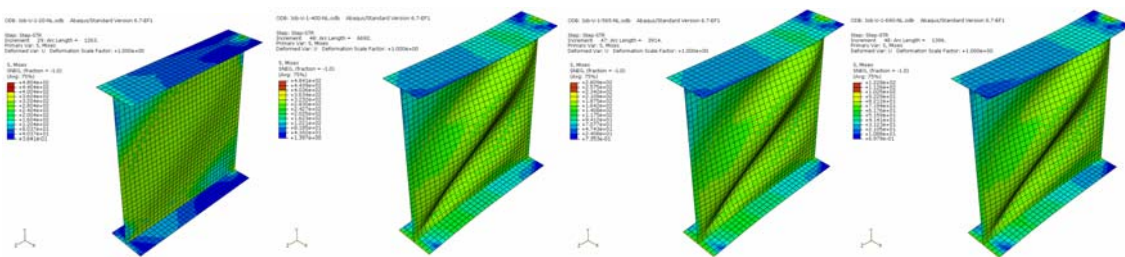


Figura 5: Modo de colapso do painel com  $a/h = 1$  para 20°C, 400°C, 565°C e 690°C respectivamente

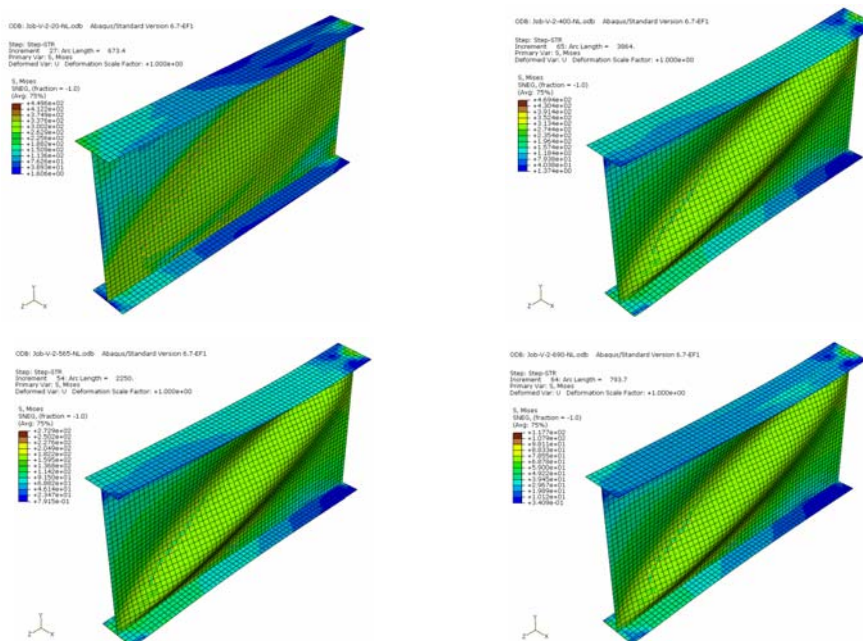
Na Tabela 1 podem ser comparados os valores das forças cortantes resistentes de ensaios, numéricos e analíticos obtidos por Vimonsatit *et al.* (2007b) e os valores numéricos e analíticos determinados neste trabalho (os numéricos foram obtidos conforme exposto neste item, usando o programa ABAQUS, Hibbit *et al.*, 1998, e os analíticos conforme o item 2). Observa-se uma grande aproximação entre os resultados de Vimonsatit *et al.* (2007b), incluindo aqueles dos ensaios, e os deste trabalho e, entre os deste trabalho, uma concordância muito boa entre os resultados analíticos e numéricos, permitindo que sejam considerados validados a modelagem numérica utilizada e o procedimento analítico proposto.

Temperatura (°C)	Vimonsatit <i>et al.</i> (2007b)			Este trabalho				
	(V-1)	(V-2)	(V-3)	(T-1)	(T-2)	Razões		
	Ensaio (kN)	MEF-V (kN)	Análítico-V (kN)	MEF-T (kN)	Análítico-T (kN)	(T-1)/(V-1)	(T-2)/(V-1)	(T-2)/(T-1)
20	79,85	88,00	87,50	81,61	83,07	1,02	1,04	1,02
400	67,63	66,00	65,20	63,69	69,99	0,94	1,03	1,10
565	34,34	38,40	37,13	36,82	37,20	1,07	1,08	1,01
690	17,15	16,40	15,70	15,83	15,86	0,92	0,92	1,00

Tabela 1: Comparação entre forças cortantes resistentes de Vimonsatit *et al.* (2007b) e deste trabalho

#### 4 RESULTADOS PARA PAINÉIS COM VÁRIAS RELAÇÕES GEOMÉTRICAS

Com objetivo de estender a validade do procedimento analítico para toda a faixa de razão entre comprimento do painel e altura da alma ( $a/h$ ) na qual, de acordo com o ANSI/AISC 360-05 (ver subitem 2.2), o efeito do campo de tração pode ser considerado à temperatura ambiente, foram processados pelo MEF, usando o programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998), painéis de alma com as mesmas características do utilizado no item precedente, e nas mesmas temperaturas, com valores de  $a/h$  iguais a 2 e 3. Adicionalmente, embora o valor 3 seja o limite superior, foi ainda processado um painel de alma com razão de aspecto  $a/h$  igual a 4, para avaliar se o efeito do campo de tração teria influência significativa sobre a força cortante resistente, um pouco além da faixa permitida por norma para sua consideração. As Figuras 6, 7 e 8 mostram os modos de colapso nas diversas temperaturas, obtidos no processamento, para  $a/h$  igual a 2, 3 e 4, respectivamente, e a Tabela 2 as forças cortantes resistentes obtidas pela modelagem numérica e pelo procedimento analítico. Essa tabela, para  $a/h$  igual a 4, mostra também os resultados auferidos quando se despreza o efeito do campo tração, uma vez que tal valor situa-se fora do limite normativo em que esse efeito pode ser considerado.

Figura 6: Modo de colapso do painel com  $a/h = 2$  para 20°C, 400°C, 565°C e 690°C respectivamente



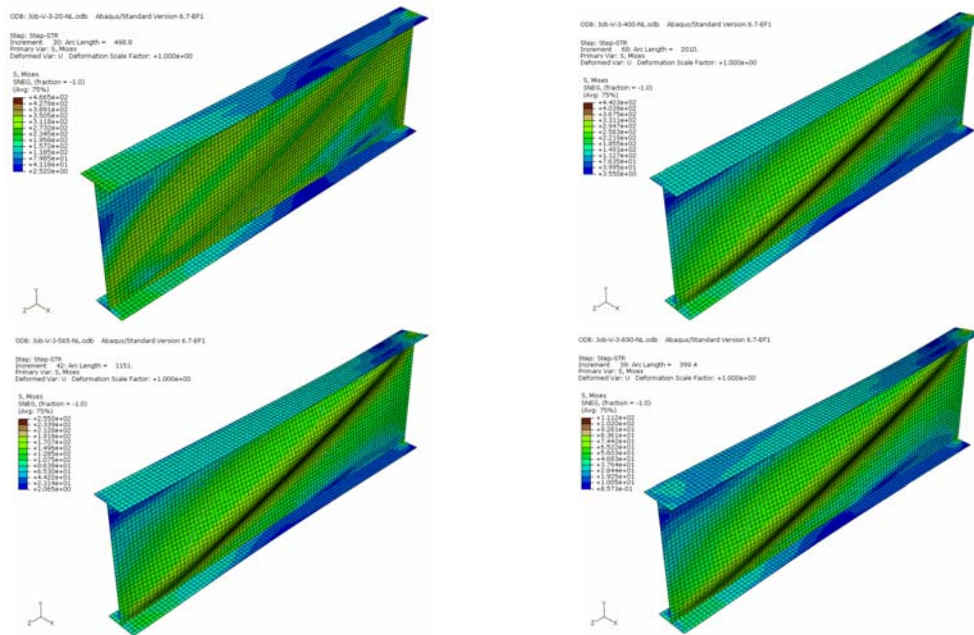


Figura 7: Modo de colapso do painel com  $a/h = 3$  para 20°C, 400°C, 565°C e 690°C respectivamente

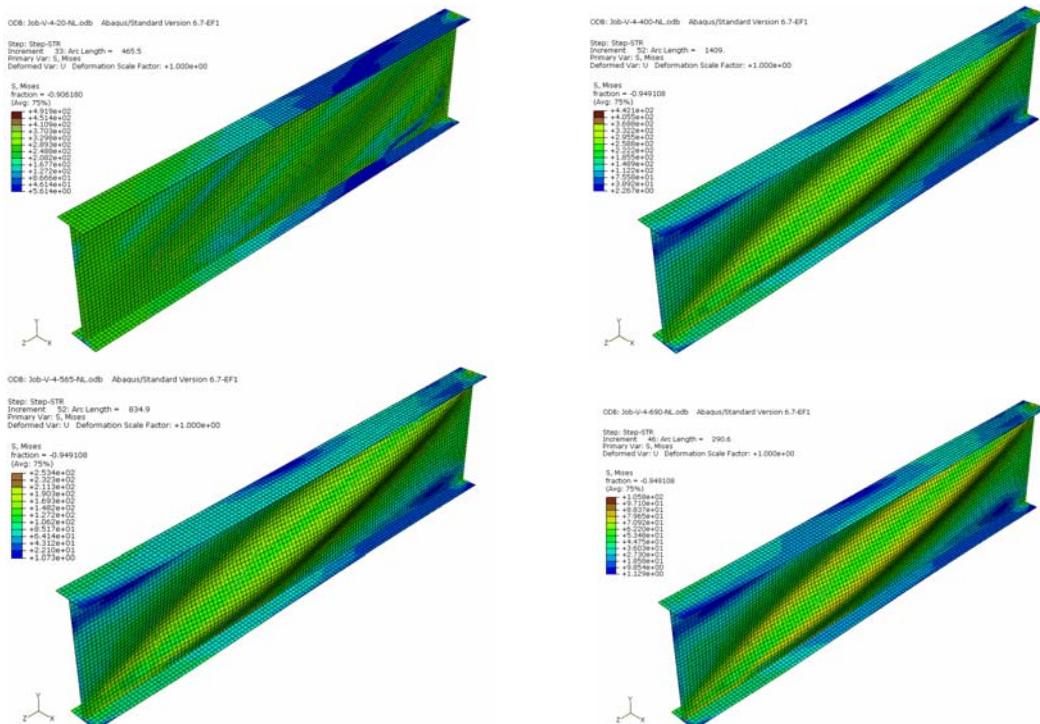


Figura 8: Modo de colapso do painel com  $a/h = 4$  para 20°C, 400°C, 565°C e 690°C respectivamente

Temperatura (°C)	$a/h = 2$			$a/h = 3$			$a/h = 4$			
	M <sup>(1)</sup> (kN)	A <sup>(2)</sup> (kN)	M/A	M <sup>(1)</sup> (kN)	A <sup>(2)</sup> (kN)	M/A	M <sup>(1)</sup> (kN)	A <sup>(2)</sup> (kN)	M/A	A-s <sup>(3)</sup>
20	67,69	59,12	1,145	62,10	46,19	1,344	59,79	40,97	1,459	23,76
400	51,56	45,40	1,136	47,40	35,17	1,348	45,43	30,85	1,473	16,63
565	30,40	26,24	1,159	27,36	20,36	1,345	26,48	17,90	1,479	9,79
690	12,79	11,00	1,163	11,27	8,43	1,336	10,89	7,28	1,500	3,52

(1) Força cortante resistente obtida pela modelagem numérica.  
(2) Força cortante resistente obtida pelo procedimento analítico considerando ao efeito do campo de tração.  
(3) Força cortante resistente obtida pelo procedimento analítico desconsiderando ao efeito do campo de tração.

Tabela 2: Forças cortantes resistentes pelo MEF e pelo procedimento analítico deste trabalho

Como ilustração adicional, a Figura 9 mostra, em gráficos executados por variação linear entre os pontos obtidos, a variação da força cortante resistente nominal  $V_{Rk}$  obtida pela modelagem numérica e pelo procedimento analítico considerando o efeito do campo de tração, em função da temperatura e da razão de aspecto  $a/h$  do painel de alma. No caso de  $a/h$  igual a 4, é mostrada também a variação da força cortante resistente obtida pelo procedimento analítico desconsiderando o efeito do campo de tração.

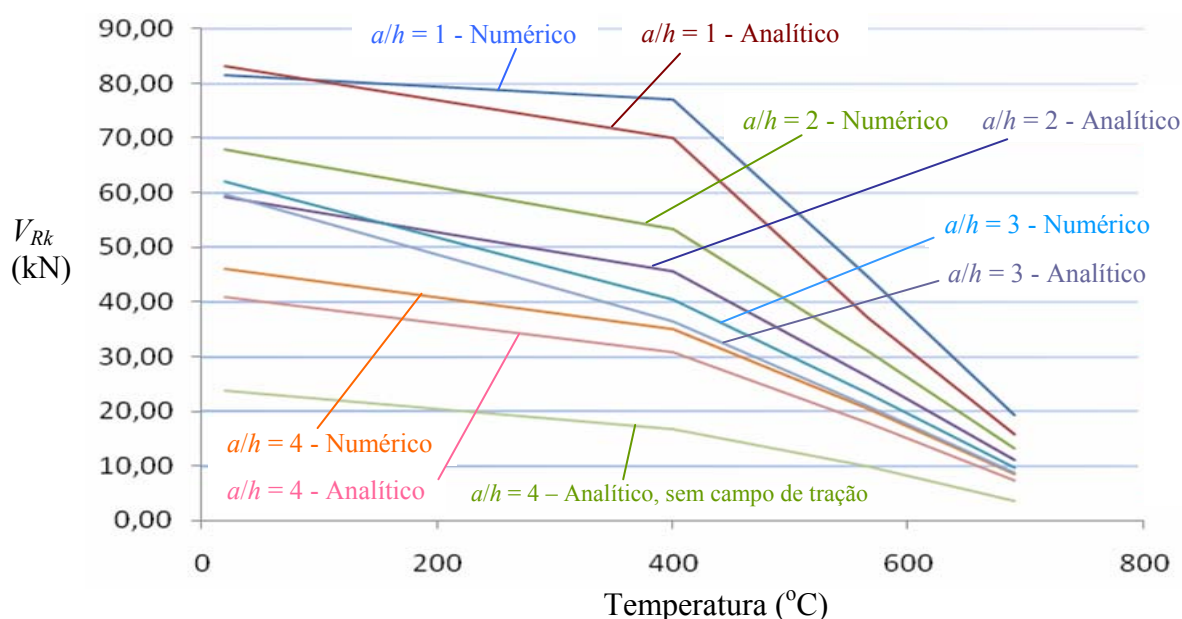


Figura 9: Variação da força cortante resistente com a temperatura e com a razão de aspecto do painel de alma

Percebe-se que, na proporção em que a razão de aspecto do painel de alma  $a/h$  se eleva, o procedimento analítico proposto neste trabalho fornece valores cada vez mais conservadores em relação aos da análise numérica (para  $a/h$  igual a 1, os resultados ficam muito próximos, e para  $a/h$  iguais a 2, 3 e 4, os resultados numéricos ficam da ordem de 15%, 34% e 48% superiores aos analíticos, respectivamente). Esse fato indica que o procedimento analítico é conservador dentro dos limites estudados (exceto para  $a/h$  igual a 1 – ver item 3 deste trabalho), com esse conservadorismo se elevando com o aumento de  $a/h$ . No caso de  $a/h$  igual a 4, embora um pouco fora da faixa em que se permite o uso do efeito do campo de tração, observou-se que tal efeito ainda influenciou significativamente nos resultados, sendo que sua desconsideração conduziria a forças cortantes resistentes extremamente reduzidas em relação às da análise numérica.

Os resultados fornecidos parecem evidenciar que, caso fosse aumentado continuamente a razão de aspecto do painel de alma para além de 4, o conservadorismo do procedimento analítico inicialmente se elevaria ainda mais, mas depois decresceria até que, sob um certo valor de  $a/h$ , não determinado neste trabalho, o efeito do campo de tração deixaria de influenciar nos resultados. Sob esse valor e valores maiores da razão de aspecto, as forças cortantes obtidas pelo procedimento analítico, mesmo sem considerar o efeito do campo de tração, e pelo procedimento numérico se aproximariam.

Embora não seja o foco principal deste trabalho, não pode deixar de ser destacado que as observações supracitadas a respeito do conservadorismo do procedimento analítico são válidas mesmo à temperatura ambiente. Aliás, o nível de conservadorismo mostrou-se basicamente o mesmo para as temperaturas ambiente e elevada. É interessante ainda mencionar que o procedimento analítico vem sendo usualmente empregado, na prática, nos projetos estruturais à temperatura ambiente, com ou sem a consideração do efeito do campo de tração (obviamente, quando esse efeito não é considerado, dependendo da razão de aspecto, o projeto se torna ainda mais conservador).

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um procedimento para determinação da força cortante resistente nominal de painéis de alma de vigas de aço com seção I, considerando o efeito do campo de tração, em situação de incêndio.

Para se chegar ao procedimento, inicialmente foi desenvolvida e aferida, com base em resultados de Vimonsatit *et al.* (2007a,b), uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, para análise não-linear, prevendo comportamentos elástico e inelástico, usando o Programa ABAQUS (Hibbit *et al.*, 1998). Posteriormente, foram processados painéis de alma com razão entre comprimento e altura da alma (razão de aspecto) variando entre 1 e 4, abrangendo-se toda a faixa em que se permite utilizar o efeito do campo de tração e ainda ultrapassando ligeiramente tal faixa.

Ao final, chegou-se a um procedimento, de fácil utilização prática, que adota a mesma formulação da ANSI/AISC 360-05 para temperatura ambiente, apenas corrigindo-se a resistência ao escoamento do aço por meio dos fatores de redução  $k_{y,0}$  em temperatura elevada fornecidos pela norma britânica BS 5950-8:1990 para deformação total de 0,5%, com base na premissa de as almas serem suscetíveis à flambagem, e o módulo de elasticidade do aço por meio dos fatores  $k_{E,0}$  do EN 1993-1-2:2005 e ABNT NBR 14323:1999. No entanto foi verificado que esse procedimento apresenta resultados conservadores quando a razão de aspecto do painel de alma se situa entre 2 e 4, por não considerar de forma mais precisa o efeito do campo de tração, o que não inviabiliza seu uso prático (curiosamente, essa mesma constatação foi feita também para a temperatura ambiente). Tal fato indica a necessidade de estudos adicionais, envolvendo razões de aspecto superiores a 4.

## 6 AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq, que tornaram possível a elaboração e a apresentação deste trabalho.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, 2008.
- ABNT NBR 14323:1999. Dimensionamento de Estruturas de Aço de Edifícios em Situação de Incêndio. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, 1999.
- ANSI/AISC 360-05. *Specifications for structural steel buildings*. American Institute of steel Construction, Chicago, USA, 2005.
- BS 5950 - Part 8: 1990. *Structural use of steelwork in building*. In: Code of practice for design fire resistance design. British Standards Institution; Londres, 1990.
- Camargo, A. L. 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*, Belo Horizonte, 2010.
- Hibbitt, Karlsson and Sorensen. ABAQUS/Standard – User’s manual, Vol. I, II e III, *Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc*, EUA, 1998.
- McGuire, W. *Steel Structures*, Prentice Hall/Englewood Cliffs, Londres, 1968.
- Vimonsatit, V.; Tan, K. H.; Ting, S. K., *Shear strength of plate girder web panel at elevated temperature*. *Journal of Constructional Steel Research*, 63:1442-1451, 2007a.
- Vimonsatit, V.; Tan, K. H.; Ting, S. K. *Testing of plate girder web panel loaded in shear at elevated temperature*. *Journal of Structural Engineering*, June 2007:815-824, 2007b.