

Tema: Proteção das estruturas: corrosão e incêndio

Sobre a estabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio

Társis Rafael Silva Travassos Oliveira¹

Valdir Pignatta Silva²

¹ Mestrado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Sócio Diretor da Grifa Engenharia Associados LTDA, Professor da Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, SP, Brasil - tarsis@grifaengenharia.com.br

² Professor Doutor Sênior da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. valpigss@usp.br

Resumo

A estabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio está diretamente relacionada à rigidez à flexão dos elementos, que depende da variação do módulo de elasticidade com a temperatura e aos efeitos das imperfeições geométricas. Lamentavelmente, o tema: “segurança contra incêndios”, só recebe a devida atenção após grandes desastres. Ainda nos dias atuais, há carência de profissionais e trabalhos nessa área. O objetivo deste trabalho é contribuir com a segurança das estruturas em situação de incêndio e apresentar os mais recentes trabalhos, em nível nacional e internacional, sobre análise não linear geométrica em situação de incêndio, levando em conta os efeitos global e local. Entre as várias referências bibliográficas, se apresentará o ponto de vista das normas europeia e norte-americana sobre o assunto. Como resultado deste trabalho, vai-se apresentar o estado da arte sobre a estabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio, de maneira que em um próximo trabalho possa-se analisar, em situação de incêndio, os coeficientes B_1 e B_2 utilizado para amplificação dos esforços solicitantes na ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

Palavras-chave: Estruturas de aço; incêndio; não linearidade; estabilidade.

Stability of steel structures in fire

Abstract

The stability of steel structures in fire is directly related to the elements stiffness, which depends on the elasticity modulus change with the temperature and the effects of geometric imperfections. Unfortunately the theme “fire safety” only receives the adequate attention after major disasters. Even today, there is a lack of professionals and works in this area. The objective of this work is to contribute to structures fire safety and present the more recent works at national and international level on geometric nonlinear analysis, taking into account the global and local effects. Among the many references, we will present the point of view of Eurocode 3 and AISC about the matter. As a result of this work is presented the state of art on the stability of steel structures in fire in order to allow a future work to analyze, in case of fire, the B_1 and B_2 coefficients used for amplification of the internal forces in ABNT NBR 8800:2008 – Design of steel and composite structures for buildings.

Keywords: Steel structures; Fire; Nonlinearity; Stability

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Nas estruturas de aço, por melhor que seja a sua execução e a qualidade da fabricação do material, existem sempre imperfeições do material e da construção, tais como: tensões residuais, excentricidades nas ligações e nas forças aplicadas, falta de verticalidade das peças, entre outras. Essas imperfeições introduzem esforços adicionais que devem ser considerados na análise e dimensionamento das estruturas e desconsiderá-las podem levar a erros significativos contra a segurança da edificação.

A determinação de esforços e deslocamentos de uma estrutura depende, pois, da análise da estabilidade global e local dos seus elementos, considerando-se as imperfeições geométricas e do material. Registra-se que, neste artigo, o termo global está relacionado aos deslocamentos dos nós da estrutura, enquanto que o termo local refere-se a não retilinearidade dos eixos das barras. O termo localizada se referirá a instabilidades que ocorrem na seção transversal.

Em situação de incêndio, o fenômeno da estabilidade das estruturas tem sido bastante estudado, mas ainda há muito que avançar. Considerando-se, por um lado, a redução do módulo de elasticidade com a elevação da temperatura e, por outro, que o valor de cálculo das forças decorrentes da ação do vento pode ser considerado nulo, torna-se importante estudar esse assunto e encontrar um procedimento adequado para dimensionamento. A norma brasileira apresenta uma recomendação de como se considerar a estabilidade em função da deslocabilidade das estruturas, sem, no entanto, ter uma base científica muito sólida.

Lamentavelmente, o tema “segurança contra incêndios” só recebe a devida atenção após grandes desastres, como por exemplo, o incêndio na boate Kiss, uma tragédia que matou 243 pessoas e feriu outras 680 na cidade de Santa Maria, no estado brasileiro do Rio Grande do Sul, esse incêndio ocorreu no dia 27 de janeiro de 2013. O que fundamenta a segurança contra incêndio de uma edificação é minimizar o risco à vida dos ocupantes, proteger o patrimônio da vizinhança, do meio ambiente e reduzir a perda patrimonial da edificação sinistrada. O objetivo deste trabalho é contribuir com a segurança contra incêndio e apresentar os mais recentes trabalhos, em nível nacional e internacional, sobre análise não linear geométrica em situação de incêndio, levando em conta os efeitos global e local.

Preocupados com esse assunto, diversos pesquisadores do mundo inteiro têm desenvolvido nos últimos anos importantes pesquisas experimentais e numéricas sobre o comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio. Isso tem possibilitado avaliações da segurança estrutural cada vez mais aprimoradas sobre o “real” desempenho de edifícios de aço sob fogo. focando a pesquisa sobre a estabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio apresenta-se neste trabalho o estado da arte sobre o tema.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1.1 ESTADO DA ARTE

A capacidade resistente das estruturas de aço em situação de incêndio pode ser caracterizada em 4 (quatro) níveis:

- Comportamento do material sob temperaturas elevadas considerando os efeitos da não linearidade do material;
Comportamento da seção transversal considerando efeitos de instabilidade localizada, em particular, instabilidade localizada e distorcional;
- Comportamento das barras considerando os efeitos de instabilidade local, em particular, flexão, flexotorção e instabilidade lateral com torção;
- Comportamento global da estrutura considerando efeitos com base em grandes deformações, mudança do sistema estrutural ou caminho alternativo para as forças.

Os estudos sobre estabilidade e comportamento de barras em situação de incêndio, revelam a influência acentuada da relação não linear da tensão-deformação na resistência do elemento em aço sob temperaturas elevadas. (KNOBLOCH e FONTANA [1]).

CULVER [2] apresentou um dos mais antigos estudos analíticos sobre instabilidade de pilares de aço sob temperaturas elevadas. Nesse trabalho, pilares laminados do tipo mesas paralelas carregados axialmente foram submetidos a diferentes gradientes de temperatura longitudinais, variando-se também os tipos de apoio. As equações diferenciais que governam o problema foram solucionadas por meio de diferenças finitas para 16 pontos nodais ao longo das barras.

Ampliando o trabalho desenvolvido por CULVER [2], OSSENBRUGGEN et al., [3] incluiu efeitos decorrentes de tensões residuais para três tipos de perfis de aço: laminados, soldados e tubulares. Os resultados analíticos alcançados, supondo uma distribuição longitudinal e transversal constante de temperatura, culminaram em expressões aproximadas para o cálculo de tensões máximas para impedir a instabilidade de pilares de aço sob temperatura elevada.

Tanto CULVER [2] como OSSENBRUGGEN et al. [3], adotaram na determinação da rigidez a flexão curvas bilineares de tensão-deformação propostas por BROCKENBROUGH [4].

Dando continuidade à sua pesquisa, OSSENBRUGGEN et al. [5] deixa de considerar uma distribuição longitudinal e transversal constante de temperatura e passa a considerar efeitos de tensões térmicas induzidas pela expansão causada pelos gradientes de temperatura ao longo da seção transversal e comprimento das barras. Nesse estudo, a deformada da barra é obtida por meio de um procedimento numérico incremental-iterativo.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

DROTREPPE e FRANSEN [6] e FRANSEN [7] desenvolveram um modelo computacional com base no método dos elementos finitos para análise plana de pórticos mistos em situação de incêndio. Nesse estudo, a distribuição de temperaturas ao longo da seção transversal é obtida por meio de análise térmica. O desenvolvimento do programa CEFICOSS (*Computer Engineering of the Fire design of Composite and Steel Structures*) representou a primeira geração de programas de análise estrutural com consideração do efeito do incêndio desenvolvido na Universidade de Liège. Posteriormente, Franssen aprimorou e estendeu seu procedimento de análise para três dimensões resultando o programa SAFIR. (FRANSEN et al.[8]).

OLAWALE [9] implementou uma formulação de faixas finitas para análise de pilares perfeitos isolados em situação de incêndio, essa ferramenta numérica que leva em consideração tensões residuais, carregamentos excêntricos e instabilidade localizada foi utilizada por BURGESS et al. [10], [11], [12] na obtenção de soluções numéricas para diversos pilares perfeitos sob temperaturas elevadas.

EL-RIMAWI [13] estudou vigas de aço sob flexão pura em situação de incêndio por meio de procedimento numérico com base na rigidez secante dos elementos. Tal análise foi estendida por SAAB [14] para análise não linear de pórtico planos deslocáveis e não deslocáveis sob fogo.

FRANSEN; SCHLICH e CAJOT [15] utilizaram um modelo geral, isto é, um código de computador de análise não linear para determinar a força que provoca instabilidade de membros axialmente carregados de acordo com as hipóteses do EUROCODE 3 [16]. Instabilidade segundo dois eixos, seis temperaturas finais e 10 comprimentos diferentes foram consideradas para 339 perfis de aço seção H diferentes. Os resultados numéricos foram estatisticamente classificados e comparados aos modelos simples apresentados no EUROCODE 3 [16].

SILVA [17] propõem um método simplificado de dimensionamento de estruturas sob ação do fogo, levando-se em consideração a influência dos efeitos não lineares geométricos e do material. Posteriormente, SILVA [18] analisou o comportamento de pórticos submetidos a temperaturas elevadas, por meio do método dos elementos finitos (MEF). Os resultados alcançados foram comparados a recomendações previstas na revisão anterior da ABN NBR 14323:2013 [19], ou seja, a ABNT NBR 14323:1999.

TALAMONA et al.[20] apresenta o comportamento de pilares de aço submetidos a forças axiais de compressão em situação de incêndio, o estudo foi feito por meio de métodos numéricos, simulando pilares com carregamento centrado e excêntrico. Neste estudo uma proposta é feita para um coeficiente de flambagem em caso de carregamento centrado e, para o carregamento excêntrico, uma fórmula de interação, com base nas propriedades do material, aço, a temperaturas elevadas, tal como definidos no Eurocode de 1995. O trabalho sugere que

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

o coeficiente de flambagem proposto seja calibrado por meio de comparação a resultados experimentais, dessa maneira assegurando o nível adequado de segurança.

Dando continuidade ao trabalho de TALAMONA et al.[20], FRANSEN et al. [21] apresenta uma formulação analítica modificada para a situação de incêndio, com base na equação de Ayrton-Perry-Robertson que consta no Eurocode 3 parte 1-1(2005) [16], para a temperatura ambiente.

TOH et al. [22] apresenta uma equação simples e direta para determinar o esforço resistente de pilares de aço submetidas a elevadas temperaturas. Esse trabalho fundamenta-se na equação de Rankine e uma característica dessa formulação é que ela pode ser usada para forças com e sem excentricidades. Além disso, segundo os autores, a equação proposta não necessita de qualquer calibração com resultados experimentais.

KNOBLOCH; FONTANA e FRANGI [23] analisam a interação entre instabilidade local e localizada de perfis tubulares de aço em situação de incêndio. Uma série de estudos experimentais para analisar o comportamento de pilares de aço submetido a forças axiais em situação de incêndio são apresentados em YANG [24]. Esse trabalho experimental tem como objetivo analisar o efeito da relação largura-espessura das mesas do perfil, índice de esbeltez dos pilares e tensões residuais na resistência final de um pilar de aço a temperaturas elevadas.

KNOBLOCH et al. [25] apresenta um estudo comparativo considerando modelo analítico e ensaios experimentais para pilares esbeltos em aço, onde a formulação analítica desenvolvida mostrou-se eficiente na determinação da força crítica para pilares esbeltos em aço sob temperatura elevada, bem como na deformada do elemento.

SOMAINI et al. [26] apresenta um modelo analítico para pilares de aço esbeltos em situação de incêndio, com forças aplicadas no centroide e excêntricas. O modelo analítico apresentado é verificado com ensaios experimentais e, com base nesse resultado, apresenta-se uma formulação para instabilidade à flexão, formulação que já contempla a relação não linear do gráfico tensão-deformação do aço a temperaturas elevadas, imperfeições geométricas e carregamentos excêntricos.

Uma abordagem sobre engenharia de segurança contra incêndio para projeto é discutida em MOORE e LENNON [27]. Esse trabalho foca no desempenho estrutural de edifícios completos em situação de incêndio e o desenvolvimento de modelos analíticos para previsão da resposta estrutural a temperatura elevada. A partir de observações de incêndios reais o trabalho afirma que a resistência ao fogo de estruturas completas é significativamente melhor do que a dos elementos individuais, a partir do qual a resistência ao fogo é geralmente avaliada.

Devido ao comportamento dúctil do aço, grandes deformações e rotações podem ocorrer mesmo sem uma perda significativa da capacidade de carga do elemento sob temperaturas elevadas. Com base em estudos experimentais e numéricos sobre a influência de uma falha

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

local no revestimento contra fogo sobre a resistência ao fogo de elementos estruturais de aço, KNOBLOCH et al [28], analisa a vulnerabilidade e robustez do revestimento contra fogo e suas consequências para edifícios altos. Para ações excepcionais, como terremoto, impacto de veículos ou explosão seguida de um incêndio posterior, a vulnerabilidade de proteção contra incêndios é importante para a segurança estrutural de edifícios altos e evitam o colapso progressivo. Nessa mesma linha de pesquisa LI; WANG e CHEN [29] realizam uma abordagem simples para modelagem de resistência ao fogo de pilares em aço com falhas locais no revestimento contra fogo. Ainda sobre o comportamento de elementos estruturais em situação de incêndio com revestimento contra fogo, o trabalho de WANG et al. [30] estuda a instabilidade *web-post* de vigas celulares em aço totalmente e parcialmente revestidas em situação de incêndio. Quando ele fala parcialmente protegida é que os furos da viga celular não receberão revestimento contra fogo, ou seja, a borda do furo fica desprotegida.

BAILEY et al. [31] afirma que simulações de incêndios reais, por meio de ensaios experimentais em edifícios em aço são caros, demorados e raros. Contudo, simulações computacionais podem permitir a aquisição de novos conhecimentos e verificar resultados empíricos com base em incêndios de construção reais.

Assim, simulações numéricas são frequentemente utilizadas como uma alternativa para verificações em incêndio. Estudos numéricos têm como objetivo analisar o comportamento estrutural, tendo em consideração: não linearidades geométricas e dos materiais, mudança de sistema estrutural, efeitos de instabilidades e os efeitos devido a ligações. Esses estudos são complexos e muitas vezes exigem programas de computador específicos. Seguindo essa linha de simulação numérica podem-se citar os trabalhos de ALASHKER; LI e TAWIL [32], KWASNIESKI [33], MASOERO et al. [34], FU [35], KIM [36], KHANDELWAL; TAWIL e SADEK [37].

Inevitavelmente, o ideal seria que todas as simulações numéricas fossem validadas por meio de ensaios experimentais, mas infelizmente isso nem sempre é possível conforme visto em BAILEY et al. [38], entretanto, FONTANA, KNOBLOCH e FRANGI [39] citam para reduzir o custo e o esforço de ensaiar experimentalmente estruturas inteiras, ensaiar apenas os elementos individuais ou partes de sistemas estruturais, enquanto as estruturas restantes são modeladas por meio de simulações numéricas. As interações dos elementos individuais e partes de estruturas, respectivamente, com estruturas inteiras são alcançados por meio de uma transferência de dados em tempo real.

ZHANG et al. [40] realiza simulações numéricas sobre o comportamento de pilares curtos em aço submetidos a incêndios localizados, a condição de aquecimento considerada foi não uniforme o que resultou em uma temperatura crítica mais elevada que a condição de temperatura uniforme. As simulações numéricas foram realizadas com o programa ANSYS e o trabalho afirma que as equações apresentadas no EUROCODE 3 [16] são conservadoras para pilares curtos em aço submetidos à incêndios localizados.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Simulações numéricas têm sido realizadas até mesmo em programas de computador que originalmente não possuíam o foco em incêndio, como é o caso do programa aberto desenvolvido na Universidade de Berkeley OpenSees. Essa ferramenta computacional concentra esforços na resposta não linear de estruturas submetidas a excitações sísmicas. O trabalho de JIANG e USMANI [41] desenvolve uma análise termomecânica de estruturas em situação de incêndio. Os resultados foram validados com soluções analíticas disponíveis na literatura, bem como com os resultados do programa ABAQUS.

Um modelo em elementos finitos não linear tridimensional foi desenvolvido por KODUR e NASER [42] para avaliar a resposta de vigas de aço expostas ao fogo submetidas aos esforços de flexão e cisalhamento. Os resultados das análises demonstram que em determinados cenários de carregamento e tipos de seção transversal, a capacidade resistente ao cisalhamento em vigas de aço pode diminuir mais rapidamente do que a capacidade resistente do momento fletor. Além disso, os resultados das simulações numéricas demonstram que seções classificadas, com base na instabilidade local, como compactas à temperatura ambiente podem transformar-se em semi-compactas ou esbeltas quando expostas ao fogo. Isso pode induzir deformações localizadas e levar a seção ao colapso antes da ruptura por flexão ou cisalhamento. Dando continuidade às suas pesquisas NASER e KODUR [43] apresentam fatores críticos que influenciam o começo da instabilidade localizada em vigas de aço quando submetidas a situações de incêndio. O modelo tridimensional não linear em elementos finitos é aplicado para investigar o efeito da interação entre a laje de concreto e a viga de aço. Nessa linha da contribuição da laje de concreto no comportamento de vigas em aço, pode-se citar também o trabalho de PAKALA e KODUR [44]. As simulações numéricas de todos esses trabalhos foram realizadas com o programa ANSYS.

Uma simulação numérica realizada no programa ABAQUS é apresentada em LAIM e RODRIGUES [45], em que a resposta de vigas de aço de perfis formados a frio, com restrições de movimentos de translação axial e rotação foi analisada. Um modelo de elementos finitos adequado foi validado por meio de ensaios experimentais. Alguns parâmetros que poderiam ter influência sobre o comportamento dessas vigas foram avaliados, tal como a geometria da seção, a força inicial aplicada, esbeltez e influência das restrições de movimentos. Os resultados mostraram que a temperatura crítica de vigas axialmente restringidas pode subir significativamente e, além disso, ainda concluiu-se que o método estabelecido na norma europeia não é apropriado para o projeto em situação de incêndio das referidas vigas.

COUTO et al. [46] apresenta uma análise de estabilidade de pórticos planos de aço, tendo em conta o efeito da temperatura, a fim de avaliar os comprimentos de flambagem dos pilares em situação de incêndio. Os resultados obtidos para os comprimentos de flambagem são comparados aos sugeridos no EUROCODE 3 [16] para pilares em pórticos contraventados em situação de incêndio. O EUROCODE 3 [16] não fornece regras sobre os comprimentos de flambagem para pórticos não contraventados, de modo que esse estudo oferece uma proposta para os comprimentos de flambagem de pilares em estruturas de aço não

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

contraventadas. No entanto, deve notar-se que o uso de comprimentos de flambagem de uma análise à temperatura ambiente para estruturas em situação de incêndio pode levar a resultados conservadores. Nessa linha de pesquisa de comprimento de flambagem de pilares em situação de incêndio, pode-se citar também o trabalho de GOMES et al. [47], em que os autores propõem uma formulação alternativa ao EUROCODE 3 [16] para determinação de comprimento de flambagem de pilares em situação de incêndio.

Problemas elástico não linear para pórticos planos, feito de vigas retilíneas de aço submetidos a altas temperaturas, é apresentado em LUONGO e CONTENTO [48]. O elemento de base para o estudo é a viga de Euler-Bernoulli, cujo alongamento é uma função não linear dos deslocamentos.

O comportamento de pilares de aço restringidos axialmente submetidos a elevadas temperaturas é discutido com detalhe em SHEPHERD e BURGESS [49], onde o modelo desenvolvido foi validado por meio de uma análise em elementos finitos não linear utilizando o programa Vulcan.

McCANN et al. [50] analisa o comportamento sobre instabilidade localizada e esforço resistente da seção transversal de perfis tubulares elípticos na compressão. Os modelos numéricos foram primeiramente validados com modelos experimentais disponíveis na literatura, no entanto, para esse trabalho foi considerada uma temperatura uniforme.

THEOFANOUS et al. [51] estende o CSM (*continuous strength method*) para o projeto estrutural de seções transversais de aço em situação de incêndio. A validação do método é feita por meio dos resultados disponíveis na literatura. Observações semelhantes foram feitas anteriormente para projeto estrutural de aço inoxidável à temperatura ambiente e o CSM foi desenvolvido como um meio racional de explorar o encruamento do material à temperatura ambiente.

Na linha do aço inoxidável, LOPES et al. [52] apresenta uma avaliação da precisão e segurança das recomendações estabelecidas no EUROCODE 3 [16], para a resistência ao fogo de aço inoxidável de vigas-pilar, com e sem avaliações de instabilidade lateral com torção. Nesse estudo, as influências das tensões residuais, seções transversais, a forma dos diagramas de momento de flexão e o tipo de aço inoxidável são considerados.

HEIDARPOUR; AZIM e BRADFORD [53] aborda o comportamento termoelástico não linear de arcos de aço submetidos a forças uniformemente distribuídas sob temperaturas elevadas. A formulação apresentada nesse artigo leva em conta a redução da rigidez do arco de aço em função do aumento da temperatura. Mostra-se que o modelo proposto concorda bem com soluções independentes obtidas usando análises em elementos finitos por meio do programa ABAQUS. O modelo proposto tem um potencial significativo para utilização na análise de arcos de aço, tais como coberturas de grandes.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Um estudo numérico sobre o comportamento de pórticos de aço em perfis tubulares expostos ao fogo é apresentado em EL-HEWEITY [54]. Nesse trabalho, um modelo é desenvolvido incorporando não linearidade geométrica e do material para obter respostas tanto térmicas quanto estruturais. Para estabelecer o mecanismo de ruptura de um pórtico em situação de incêndio, um critério de ruptura é proposto e validado com dados experimentais disponíveis na literatura. A ferramenta computacional utilizada no trabalho foi o programa SAFIR.

LANDESMANN [55] apresenta uma ferramenta computacional fundamentada no modelo da rótula plástica, denominado Programa SAAFE, desenvolvido para fornecer uma análise elastoplástica não linear de aço e compósitos (aço-concreto) para pórticos planos. Com base nos resultados obtidos, é possível inferir sobre a eficiência e a robustez do modelo proposto para realizar análises elastoplásticas de elementos isolados e estruturas planas reticuladas, incorporando não linearidade geométrica e do material.

Uma abordagem baseada em desempenho é apresentada em DWAIKAT e KODUR [56]. A abordagem proposta fundamenta-se em equações de equilíbrio e de compatibilidade. Leva em consideração a influência de muitos fatores, incluindo cenário de incêndio, restrições nas extremidades, tipo de ligação, gradiente térmico, nível de carregamento, geometria da viga e critérios de ruptura. A validade da abordagem é estabelecida por meio da comparação a resultados obtidos a partir de análises rigorosas em elementos finitos realizada no programa ANSYS.

SEIF e McALLISTER [57] apresentam um estudo paramétrico empregando materiais e análises geometricamente não lineares em elementos finitos para modelar a resposta de seções de mesas paralelas de pilares em aço a temperaturas elevadas. O estudo paramétrico variou a força axial e a esbeltez da seção transversal dos pilares. Esses pilares foram uniformemente aquecidos até apresentarem instabilidade elástica ou elastoplástica.

Uma tese de doutorado apresentada em PAULI [58] estuda o comportamento de pilares de aço em situação de incêndio com base no comportamento do material e na capacidade da seção transversal. Extensas investigações experimentais sobre o comportamento do aço a temperaturas elevadas por meio de ensaios em forno de pilares esbeltos servem como comprovação do trabalho. Esses ensaios são complementados com simulações em elementos finitos. Os resultados são comparados aos modelos recomendados nas normas europeias. A tese é dividida em três capítulos principais, o primeiro que analisa o comportamento do material, o segundo apresenta a resistência da seção transversal e, por fim, apresenta a estabilidade de pilares de aço a temperaturas elevadas.

No EUROCODE 3 [16], a temperatura que leva à instabilidade de pilares em aço pode ser calculado por meio de uma abordagem analítica ou utilizando uma equação de forma fechada simples, ZHANG; LI e WANG [59] investiga a precisão e limitações desses dois métodos de

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

cálculo. Os dados dos testes em pilares de aço submetidos a temperaturas elevadas relatados na literatura são utilizados para comparação.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Buscou-se neste artigo compilar o estado da arte sobre a instabilidade de estruturas de aço em situação de incêndio e, como se viu resumidamente nos trabalhos descritos, não há trabalho em nível mundial que apresente uma formulação para a situação de incêndio dos fatores de amplificação dos esforços, B1 e B2, empregados nas normas brasileiras para a temperatura ambiente.

Os estudos sobre estabilidade e comportamento de barras em situação de incêndio, revelam as seguintes linhas de pesquisa: sobre o comportamento do material aço sob elevadas temperaturas; sobre o comportamento da seção transversal considerando efeitos de instabilidade localizada e distorcional; sobre o comportamento das barras considerando efeitos de instabilidade local, em particular, por flexão, flexotorção e instabilidade lateral com torção e, por fim, sobre o comportamento global da estrutura considerando efeitos com base em grandes deformações, mudança do sistema estrutural ou caminho alternativo para carregamentos. Lembrando que vários autores trabalham com o desenvolvimento de uma formulação analítica sendo validada por simulação computacional ou ensaios experimentais.

Os procedimentos para análise da não linearidade geométrica à temperatura ambiente das normas ABNT NBR 8800:2008 [60], AISC:2005 [61] e EUROCODE 3 [16] têm origens comuns, embora aplicadas de formas diferentes. Todas as normas estudadas apresentam procedimentos simplificados para análise da não linearidade geométrica, embora permitam o uso de análises mais refinadas, as Tabela 1 e Tabela 2 tentam sintetizar e o que as referidas normas recomendam sobre estabilidade de estruturas de aço à temperatura ambiente.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1 – Classificação quanto a deslocabilidade e modelo de análise aplicável

Norma	Classificação quanto à deslocabilidade		
NBR 8800: 2008	Pequena Deslocabilidade	Média Deslocabilidade	Grande Deslocabilidade
$B_2 = \frac{\delta_{2a}}{\delta_{1a}}$ <p>Razão entre os deslocamentos com e sem não linearidade geométrica de cada pavimento</p>	$B_2 \leq 1,1$ <p>Em todos os pavimentos A não linearidade geométrica pode ser desconsiderada se as forças axiais de cálculo nas barras que participam do sistema de estabilidade lateral não superarem 50% da força axial de plastificação. Além disso, as imperfeições geométricas iniciais devem ser sempre incluídas na análise.</p>	$1,4 < B_2 \leq 1,1$ <p>Em pelo menos 1 pavimento Admite-se análise da não linearidade geométrica simplificada utilizando os parâmetros B1 e B2 que devem ser calculados com a rigidez da estrutura reduzida para considerar a não linearidade do material.</p>	$B_2 > 1,4$ <p>Em pelo menos 1 pavimento Deve ser feita análise rigorosa da não linearidade geométrica incluindo imperfeições geométricas e material.</p>
EC3: 2010	Indeslocável	Deslocável	
$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}}$ <p>Razão entre a força de instabilidade para o pórtico e à solicitação de cálculo.</p> $\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h_i}{\delta_{H,Ed}} \right)$	$\alpha_{cr} \geq 10$ <p>Admite-se análise sem não linearidade geométrica incluindo imperfeições geométricas iniciais</p>	$\alpha_{cr} < 10$ <p>Admite-se análise da não linearidade geométrica simplificada multiplicando as ações horizontais por:</p> $C_a = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}$ <p>A consideração de imperfeições geométricas locais e globais deve ser avaliada.</p>	
AIS: 2005	Pouco Deslocável	Muito Deslocável	
$B_2 = \frac{\delta_{2a}}{\delta_{1a}}$ <p>Não estabelece uma classificação explícita mas, trata de maneira diferentes as estruturas em função do parâmetro B_2</p>	$B_2 \leq 1,5$ <p>Não linearidade geométrica simplificada sem imperfeições iniciais</p>	$B_2 > 1,5$ <p>Direct Analysis Method - análise da não linearidade geométrica que considera explicitamente as imperfeições geométricas e de material. Alternativamente utilizar o método da amplificação B_1-B_2 com rigidez reduzida e imperfeições geométricas.</p>	
	Admite análise sem a não linearidade geométrica se a solicitação normal de cálculo nos pilares que participam do contraventamento for inferior a 50% da força normal que provoca o escoamento da seção e considerando forças horizontais fictícias iguais a 0,42% das ações verticais em cada andar.		

Fonte: (SOUZA e PEREIRA [62]) Adaptado.

Tabela 2 – Imperfeições iniciais

Norma	Classificação quanto à deslocabilidade	Imperfeições Geométricas	Imperfeições de Material
NBR 8800: 2008	<i>Pequena Deslocabilidade</i> $B_2 \leq 1,1$	1. Modelar a estrutura considerando deslocamentos interpavimentos igual a $h/333$, sendo h a altura do pavimento	Não considera
	<i>Média Deslocabilidade</i> $1,1 < B_2 \leq 1,4$	2. Aplicação de forças horizontais fictícias (Fnoc) correspondentes a 0,3% das ações verticais atuantes nos pilares de cada andar. Não há necessidade de somar estas forças as ações laterais do vento.	Reduzir a rigidez a flexão e a compressão dos elementos para 0,8 EI e 0,8 EA, respectivamente.
	<i>Grande Deslocabilidade</i> $B_2 > 1,4$		
AISC:2005	<i>Pequena Deslocabilidade</i> $B_2 \leq 1,5$	Considerar Fnoc ao nível de cada pavimento somente se não atuar força do vento.	Não considera
	<i>Grande Deslocabilidade</i> $B_2 > 1,5$	Aplicação de Fnoc correspondentes a 0,3% das ações verticais atuantes nos pilares de cada andar	Reduzir a rigidez a flexão e a compressão dos elementos para 0,8 EI e 0,8 EA, respectivamente.
		Aplicação de Fnoc correspondentes a 0,2% das ações verticais atuantes nos pilares de cada andar	$EI = 0,8 \tau_b EI$ $\tau_b = 1$ se $\alpha \frac{P_r}{P_y} \leq 0,5$ $\tau_b = 4 \left[\alpha \frac{P_r}{P_y} \left(1 - \alpha \frac{P_r}{P_y} \right) \right]$ se $\alpha \frac{P_r}{P_y} >$ P_r : Força Normal de Cálculo P_y : Força Normal de Plastificação
EC3:2010	$H_{ED} \geq 0,15 V_{ED}$	Não considera	Não considera
	$H_{ED} < 0,15 V_{ED}$	1. Modelar a estrutura com uma inclinação: $\phi = \frac{1}{200} \frac{2}{\sqrt{h}} \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$ onde : ϕ - ângulo de inclinação da estrutura h - altura total da estrutura em metros m - numero de pilares no sistema de contenção lateral 2. Aplicar forças horizontais fictícias em cada andar com valores iguais a $H_i = \phi \cdot Q_i$, onde Q_i corresponde as ações verticais no andar.	Não considera

Fonte: (SOUZA e PEREIRA [62]) Adaptado.

3. CONCLUSÃO

Em nenhum dos trabalhos executados na área de estabilidade das estruturas de aço em situação de incêndio notaram-se estudos sobre os processos de análise simplificada para não linearidade geométrica em situação de incêndio, conforme foi visto no estado da arte apresentado neste trabalho.

Dentro desse cenário, as próprias normas ABNT NBR 14323:2013 [19], AISC:2005 [61] e EUROCODE 3 [16] não apresentam os fatores de amplificações dos esforços solicitantes (B1 e B2) em situação de incêndio para análise simplificada dos efeitos de não linearidade geométrica local e global.

Essa situação evidencia a necessidade de se prosseguir com a pesquisa nesse tema. Pretende-se, em trabalhos futuros, contribuir com tais estudos visando encontrar métodos simplificados para a consideração dos efeitos das não linearidades no comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio.

Agradecimentos

Agradece-se à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS

1. KNOBLOCH, M.; FONTANA, M. **Stability of steel structures in fire - State-of-the-art, recent studies in Switzerland and future trends**. Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
2. CULVER, C. Steel Column Buckling under Thermal Gradients. **Journal of Structural Division - ASCE**, v. 98, p. 1853-1865, 1972.
3. OSSENBRUGGEN, P. J.; AGGARWAL, V.; CULVER, C. Steel Column Failure Under Thermal Gradients. **Journal of Structural Division**, v. 99, p. 727-739, 1973a.
4. BROCKENBROUGH, R. Theoretical Stresses and Strain From Heating Curving. **Journal of Structural Division**, v. 96, p. 1421-1444, 1970.
5. OSSENBRUGGEN, P. J.; AGGARWAL, V.; CULVER, C. Steel Column Failure Under Thermal Gradients. **Journal of Structural Division**, v. 99, p. 727-739, 1973b.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

6. DOTREPPE, J. C.; FRANSSEN , J. M. The use of Numerical Models for the Fire Analysis of Reinforced Concrete and Composite Structures. **Engineering Analysis**, v. 2, p. 67-74, 1985.
7. FRANSSEN, J. M. Etude du Comportement au Feu des Structures Mistes AcierBéton. **Ph.D. Dissertation**, Université de Liège, Belgium, 1987.
8. FRANSSEN, J. M.; KODUR, V. K. R.; MASON, J. User's Manual for SAFIR- 2001: A computer Program for Analysis of Structures Submitted to the Fire. **University of Liège, Department Structures du Génie Civil**, 2000.
9. OLAWALE, A. O. Collapse Behavior of Steel Columns in Fire. **Ph.D. Dissertation, University of Sheffield, Dept. Of Civil and Structural Engineering**, Sheffield, 1989.
10. BURGESS, I. W.; EL-RIMAWI, J. A.; PLANK, R. J. Analysis of Beams with Non-Uniform Temperature Profile due to Fire Exposure. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 169-192, 1990.
11. BURGESS, I. W.; OLAWALE, A. O.; PLANH, R. J. Failure of Steel Columns in Fire. **Fire Safety Journal**, v. 18, p. 183-201, 1991.
12. BURGESS, I.; EL-RIMAWI, J. A.; PLANH, R. J. Studies of the Behaviour of Steel Beams in Fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 19, p. 285-312, 1992.
13. EL-RIMAWI, J. A. The Behaviour of Flexural Members Under Fire Conditions. **Ph.D. dissertation, University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering**, Sheffield, 1989.
14. SAAB, H. A. Non-Linear Finite Element Analysis of Steel Frames in Fire Conditions. **Ph.D. dissertation, University of Sheffield, Dept. of Civil and Structural Engineering**, Sheffield, 1991.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

15. FRANSSSEN, J. M.; COOHE, G. M. E.; LATHAM, D. Numerical Simulation of a Full Scale Fire Test on a Loaded Steel Framework. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 35, p. 377-408, 1995.
16. EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES. **Part 1-2: General rules — Structural fire Design**. [S.l.]: The European Standard, 2005.

EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES. **Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting**. [S.l.]: The European Standard, 2006.
17. SILVA, V. P. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. São Paulo: Tese Apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1997.
18. SILVA, V. P. O Comportamento de Sistemas Estruturais Básicos de Aço em Situação de Incêndio. In: **XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural**, Montevideo, 2000.
19. 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: [s.n.], 2013.
20. TALAMONA, D. et al. Stability of Steel Columns in Case of Fire : Numerical Modelling. **Journal of Structural Engineering**, Reston, v. 123, p. 713-720, junho 1997.
21. FRANSSSEN, J. M. et al. Stability of Steel Columns in Case of Fire: Experimental Evaluation. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 158-163., Fevereiro 1998.
22. TOH, W.; TAN, K.; FUNG, T. Compressive Resistance of Steel Columns in Fire: Rankine Approach. **Journal of Structural Engineering**, v. 126, p. 398–405, 2000.
23. KNOBLOCH, M.; FONTANA, M.; FRANGI, A. On the interaction of global and local buckling of square hollow sections in fire. K. Rasmussen and T. Wilkinson (Eds.),

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

- Coupled Instabilities in Metal Structures The University of Sydney: Sydney, p. 587–594, 2008.
24. YANG, K. C.; HSU, R. Structural behavior of centrally loaded steel columns at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research* , p. 2062-2068, 2009
25. KNOBLOCH, M. et al. Stability of steel columns subjected to fire - Stability and Ductility of Steel Structures, Rio de Janeiro, p. 465-472, December 2010.
26. SOMAINI, D. Biegeknicken und lokales Beulen von Stahlstützen im Brandfall. **IBK Report**, n. 344, 2012.
27. MOORE, D. B.; LENNON, T. Fire engineering design of steel structures. **Progress in Structural Engineering and Materials** 1, p. 4-9, 1997.
28. KNOBLOCH, M. et al.: Vulnerability of fire protection and structural safety of tall buildings. IABSE Symposium – Creating and Renewing Urban Structures: Tall Buildings, Bridges and Infrastructure, IABSE: Chicago, pp. 286–287 (full paper in CD-Rom), 2008.
29. LI, G.-Q.; WANG, W.-Y.; CHEN, S.-W. A simple approach for modeling fire-resistance of steel columns with locally damaged fire protection. **Engineering Structures**, 617-622 2009.
30. WANG, et al. Web-post buckling of fully and partially protected cellular steel beams at elevated temperatures in a fire. **Thin-Walled Structures**, p. 29-38, 2016.
31. BAILEY, C. et al. **The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire**. Rotherham: British Steel, 1999.
32. ALASHKER, Y.; LI, H.; EL-TAWIL, S. Approximations in Progressive Collapse Modeling. **Journal of Structural Engineering**, p. 914–924, 2011.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

33. KWASNIEWSKI, L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building. **Engineering Structures**, p. 1223–1235, 2010.
34. MASOERO, E. et al. Progressive Collapse Mechanisms of Brittle and Ductile Framed Structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 136, p. 987-995, 2010.
35. FU, F. 3-D nonlinear dynamic progressive collapse analysis of multi-storey steel composite frame buildings — Parametric study. **Engineering Structures**, v. 32, p. 3974–3980, 2010.
36. KIM, J.; AN, D. Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action. **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, p. 455-465, 2009.
37. KHANDELWAL, K.; EL-TAWIL, S.; SADEK, F. Progressive collapse analysis of seismically designed steel braced frames. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 699–708, 2009.
38. BAILEY, C. et al. **The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire**. Rotherham: British Steel, 1999.
39. FONTANA, M.; KNOBLOCH, M.; FRANGI, A. Global structural behavior in fire and consolidated testing of steel, n. The Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Taylor & Francis: Cape Town, p. 687–688, 2013.
40. ZHANG, C. et al. Behavior of axially loaded steel short columns subjected to a localized fire. **Journal of Constructional Steel Research**, p. 103-111, 2015.
41. JIANG, J.; USMANI, A. Modeling of steel frame structures in fire using OpenSees. **Computers and Structures**, 90-99 2013.
42. KODUR, V. K. R.; NASER, M. Z. Effect of local instability on capacity of steel beams exposed to fire. **Journal of Constructional Steel Research**, USA, 2015.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

43. NASER, M. Z.; KODUR, V. K. R. Factors governing onset of local instabilities in fire exposed steel beams. **Thin-Walled Structures**, p. 48-57, 2016.
44. PAKALA, P.; KODUR, V. Effect of concrete slab on the behavior of fire exposed subframe assemblies with bolted double angle connections. **Engineering Structures**, 101-115 2016.
45. LAÍM, L.; RODRIGUES, J. C. Numerical analysis on axially-and-rotationally restrained cold-formed steel beams subjected to fire. **Thin-Walled Structures**, 1-16 2016.
46. COUTO, C. et al. Buckling analysis of braced and unbraced steel frames exposed to fire. **Engineering Structures**, p. 541-559, 2013.
47. GOMES, F. C. T. et al. Buckling length of a steel column for fire design. **Engineering Structures** **29**, v. nº 29, p. 2497–2502, 2007.
48. LUONGO, A.; CONTENTO, A. Nonlinear elastic analysis of steel planar frames under fire loads. **Computers and Structures**, 2015.
49. SHEPHERD, P. G.; BURGESS, I. W. On the buckling of axially restrained steel columns in fire. **Engineering Structures**, 2011.
50. MCCANN, F. et al. Local buckling and ultimate strength of slender elliptical hollow sections in compression. **Engineering Structures**, p. 104-118, 2016.
51. THEOFANOUS, M. et al. The continuous strength method for steel cross-section design at elevated temperatures. **Thin-Walled Structures**, p. 94-102, 2016.
52. LOPES, N. et al. Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire. **Fire Safety Journal**, p. 35-50, 2012.
53. HEIDARPOUR, A.; ABDULLAH, A. L.; BRADFORD, M. A. Non-linear thermo elastic analysis of steel arch members subjected to fire. **Fire Safety Journal**, 2010.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

54. EL-HEWEITY, M. M. Behavior of portal frames of steel hollow sections exposed to fire. **Alexandria Engineering Journal**, 2012.
55. LANDESMANN, A. **Journal of Constructional Steel Research**, v. nº66, p. 323 - 334, 2010.
56. DWAIKAT, M. M. S.; KODUR, V. K. R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams. **Journal of Constructional Steel Research**, 2010.
57. SEIF M., McALLISTER, TP. Stability of wide flange structural steel columns at elevated temperatures. **Journal of Constructional Steel Research**, 2013, p. 17-26.
58. PAULI, J. The Behaviour of Steel Columns in Fire. IBK Report, ETH ZurichC, 2012.
59. ZHANG, C.; LI, G. Q.; WANG, Y. C. Predictability of buckling temperature of axially loaded steel columns in fire. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 75, p. 32-37, 2012. ISSN.
60. 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: ABNT, 2008.
61. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Commentary on the Specification for Structural Steel Buildings**. [S.l.]: AISC, 2005.
62. SOUZA, A. S. C. D.; PEREIRA, M. F. **Evolução das Técnicas de Análise e Códigos de Projeto em Análise de 2º Ordem de Estruturas Metálicas**. Passo Fundo: Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 2009.