

Capítulo 1

Introdução

1.1- Introdução.....	1.2
1.2- Investigação e desenvolvimento da encurvadura lateral de vigas	1.3
1.2.1- Encurvadura lateral de vigas à temperatura ambiente	1.3
1.2.2- Encurvadura lateral de vigas a temperaturas elevadas	1.4
1.3- Sumário dos capítulos	1.6
1.4- Referências	1.8

1.1- Introdução

A verificação da resistência ao fogo é parte essencial do projecto de elementos estruturais. Esta é o garante da segurança dos ocupantes do edifício e da equipa de combate ao incêndio, fornecendo a protecção adequada da estrutura e dos bens existentes no seu interior. O critério comum utilizado na definição da resistência ao fogo de um edifício é o “tempo de resistência ao fogo”, [1.1]. O seu valor é obtido com base na temperatura máxima atingida e no carregamento que cada elemento suporta, representando, em termos de uma curva de incêndio padrão, o tempo ocorrido entre a ignição e o instante em que é atingida a temperatura crítica do elemento estrutural.

A resistência do aço a temperaturas elevadas encontra-se definida com grande detalhe, sendo conhecido que a 550 [°C] o aço estrutura possui somente 60 % da sua capacidade resistente à temperatura ambiente. Este valor é importante, porque antes do conceito de estado limite último, quando o dimensionamento era baseado no método da tensão admissível, a tensão máxima admissível era considerada de valor aproximadamente igual a 60% da resistência à temperatura ambiente. Este pressuposto vai de encontro ao valor aceitável de que a temperatura máxima, ou crítica, que uma estrutura suporta antes de atingir o colapso era de 550 [°C], [1.2]. Este conceito conduzia à utilização, nem sempre racional, de medidas passivas de protecção ao fogo para limitar o aquecimento dos elementos estruturais, como placas de gesso, sprays ou tintas intumescentes, representando aproximadamente 23% do custo total da construção, [1.3]. No entanto estudos de investigação, que deram origem aos códigos de projecto internacionais, mostraram que a temperatura crítica depende essencialmente do grau de utilização do elemento estrutural.

A publicação dos códigos Europeus de projecto de estruturas ao fogo, Eurocódigo 3 parte 1.2, [1.4], veio proporcionar aos projectistas um conjunto de métodos simplificados para o dimensionamento e verificação da segurança de elementos sob a acção do fogo. A verificação pode ser efectuada no domínio da resistência, domínio da temperatura ou do tempo, segundo o método apresentado na secção 2.3.1. No domínio da temperatura, o cálculo da temperatura crítica do elemento é efectuada com base na relação com o grau de utilização. No entanto, a relação apresentada, só pode ser utilizada, de forma directa, nos casos em que não são considerados critérios de

deformação ou fenómenos de instabilidade. Nestes casos, por exemplo pilares sujeitos à encurvadura ou vigas sujeitas à encurvadura lateral torsional, é necessário a utilização de um processo iterativo de cálculo, [1.5].

O estudo apresentado neste trabalho incide na análise da encurvadura lateral torsional de vigas I, através de uma perspectiva analítica, numérica e experimental. São apresentados vários estudos paramétricos dos factores que influenciam o comportamento de vigas sujeitas à encurvadura lateral à temperatura ambiente, verificando a sua importância também para temperaturas elevadas. Exemplos destes factores são, a esbelteza e as imperfeições dos elementos, o tipo de material, o diagrama de momentos existente e a posição do ponto de aplicação do carregamento.

1.2- Investigação e desenvolvimento da encurvadura lateral de vigas

1.2.1- Encurvadura lateral de vigas à temperatura ambiente

Os primeiros estudos conhecidos sobre o comportamento de vigas referem o ano de 1759 por Euler. Os primeiros trabalhos sobre o fenómeno de encurvadura lateral torsional foram publicados em 1899 por Michell e Prandtl, que consideraram o estudo de uma viga de secção transversal rectangular. Este trabalho continuado em 1905 por Timoshenko, o qual inclui o efeito do empenamento por torção em vigas I. Trabalho subsequentemente de 1929 por Wagner, [1.6], e mais tarde por outros autores (Vlasov em 1959), originou a teoria da encurvadura lateral torsional de vigas, aplicada a elementos de secção aberta, publicada por Timoshenko, [1.7]. Estudos específicos foram conduzidos durante a década de 60, encontrando-se limitados aos métodos de cálculo analítico, conforme a pesquisa apresentada por Lee, [1.8]. Depois da década de 60, com o desenvolvimento computacional, verificou-se um grande aumento dos estudos publicados sobre o efeito dos constrangimentos dos apoios, nas extremidades e em locais intermédios, na resistência de vigas à encurvadura lateral.

No seguimento de estudos efectuados na década de 50 por Flint, Horne e Massey, [1.9], Trahair em 1969 apresenta soluções analíticas do momento crítico elástico em elementos de viga com imperfeições iniciais, de deslocamento lateral e rotação, [1.10].

Nethercot em 1977, [1.11], realiza um conjunto de ensaios experimentais envolvendo a encurvadura lateral no domínio elástico, em vigas sujeitas a cargas pontuais e para diferentes condições de apoio. Apresenta uma formulação simples de cálculo para a obtenção da carga crítica de encurvadura.

Em 1977, Fukumoto e Kubo produziram uma base de dados dos resultados dos ensaios experimentais da encurvadura lateral em vigas de aço. A investigação realizada até à década de 80 permitiu o conhecimento e o entendimento da influência da secção transversal, do comprimento, da distribuição do momento, da posição do carregamento, dos estrangimentos e dos apoios, sendo possível obter-se, com precisão, a resistência à encurvadura elástica. Neste período são publicados os primeiros estudos sobre a distorção da secção recta de vigas sujeitas à encurvadura lateral torsional, por Hancock, Bradford e Trahair, [1.8], utilizando essencialmente técnicas numéricas.

No início dos anos 90, os autores Bild, Pi e Trahair dedicam o seu estudo ao desenvolvimento de modelos mais realísticos, incorporando os deslocamentos de pré encurvadura, as relações tensão – deformação, as imperfeições existentes nos elementos estruturais reais e as tensões residuais, [1.12], [1.13], [1.14].

Com base em trabalhos de investigação, em 1990 os códigos de projecto, Eurocódigo 3, AS4100 e BS5950, incluem um método de verificação à encurvadura lateral torsional. Deste então, numa perspectiva de segurança e economia, estes regulamentos têm vindo a ser actualizados. Mais recentemente, Greiner, Ofner e Salzgeber em 2000, [1.15], [1.16], viriam a propor as novas fórmulas de projecto para encurvadura lateral torsional na versão do Eurocódigo 3 part 1.1, [1.17], baseadas em resultados numéricos obtidos com diferentes casos de carga e propriedades do material.

1.2.2- Encurvadura lateral de vigas a temperaturas elevadas

O estudo do comportamento de estruturas ao fogo é relativamente recente. Os primeiros estudos são do início da década de 70, publicados por Tohr e Janss. Em 1973 Horne e Morris, [1.18], apresentam métodos de análise de estruturas de aço sujeitas a condições severas de incêndio. Pettersson e Witteveen, [1.19], em 1980, apresentam um método de cálculo analítico da capacidade resistente, baseado no valor característico das propriedades do material e das imperfeições existentes no elemento. Este método pressupõe uma distribuição uniforme da temperatura na secção transversal e no

comprimento do elemento. Reporta que o estado actual do conhecimento científico da resistência ao fogo não permite uma solução analítica mais precisa.

Smith et al, [1.20], no ano 1981, examinam os factores que originam o colapso de estruturas metálicas durante um incêndio, através do estudo de diferentes classes de aço, a influência de temperaturas entre 100-1000 [°C] nas propriedades mecânicas e o efeito do arrefecimento. Verificam que não existe deterioração das propriedades do material durante o processo de arrefecimento se o aço não atingir a temperatura de 650°C. No mesmo ano Kruppa, [1.21], apresenta resultados de vinte ensaios de resistência ao fogo de colunas em diferentes condições de apoio. Os ensaios foram efectuados em fornalhas e o fogo produzido através de material combustível sólido (madeira). Klingsch, [1.22], apresenta resultados de ensaios experimentais em colunas com e sem protecção ao fogo, existindo uma resistência ao fogo de 30 e de 90 minutos, respectivamente.

Rubert e Schaumann, [1.23], [1.24], através de ensaios produzidos em vigas, simplesmente apoiadas sujeitas à flexão, constituíram curvas tensão - deformação do aço estrutural, entre a temperatura ambiente e 1000°C. A formulação apresentada permitiu o cálculo da temperatura de colapso, de vigas com uma distribuição uniforme, em função do grau de utilização e da esbelteza do sistema estrutural. O método de cálculo de ambos os parâmetros é efectuado à temperatura ambiente.

Franssen, [1.38], em 1987 apresenta uma análise em que considera uma distribuição não uniforme da temperatura, a cedência do material e comportamento não linear geométrico. Em 1989, Melinek [1.25], apresenta três métodos de cálculo da resistência ao fogo de elementos com protecção. Mais tarde, em 1990, Franssen, com base no trabalho anterior, produziu alterações ao modelo constitutivo, incluindo a resposta na fase de descarregamento, [1.39].

Já nos anos 90, Burgess et al, [1.26], efectuam um estudo numérico de colunas geometricamente perfeitas sob a acção do fogo. Verificaram que a esbelteza é o factor que mais influencia a temperatura de colapso. Concluem que o efeito das tensões residuais no colapso da coluna não é diferente do que ocorre à temperatura ambiente.

Em 1995 Cabrita Neves, [1.28], através de ensaios experimentais estuda o efeito dos estrangimentos axiais na resistência ao fogo de colunas de aço. Analisa também o efeito da rigidez da estrutura, esbelteza da coluna e da excentricidade das forças exercidas. Mais tarde, em 2000, Rodrigues et al, [1.29], conclui através resultados

numéricos e experimentais que, quando são desprezados os efeitos devidos aos constrangimentos à dilatação térmica, a resistência ao fogo das colunas é sobrestimada.

O problema da encurvadura lateral torsional de vigas a temperaturas elevadas foi tratado por Bailey em 1996, [1.31], analisando vigas com uma distribuição de temperatura uniforme, com diferentes secções, comprimentos e diferentes valores do grau de utilização. Verificou que em todos os casos analisados o modo de colapso por encurvadura lateral torsional. Nos casos estudados as vigas de maior valor de esbelteza possuem uma temperatura crítica inferior. Os únicos ensaios experimentais, conhecidos, publicados sobre o estudo da encurvadura lateral a temperaturas elevadas foram realizados por Piloto, no ano 2000, [1.40], que executou 120 testes à escala real em perfis IPE100 de diferentes comprimentos. Os resultados experimentais permitiram validar o estudo numérico realizado por Vila Real et al, [1.41],[1.42], dando origem ao modelo de cálculo simplificado presente na actual versão do Eurocódigo 3 parte 1.2, [1.43].

Em 2003 Yin e Wang, [1.36], apresentam os resultados de um estudo paramétrico do momento resistente à encurvadura lateral de vigas sujeitas a uma distribuição uniforme e não uniforme da temperatura, utilizando o programa Abaqus. Para o caso de temperatura uniforme os valores da temperatura crítica obtidos são superiores aos preconizados pelos códigos de projecto BS5950 e ENV 1993-1-2. Vila Real et al, [1.37], realizam um estudo numérico da encurvadura lateral de vigas I, em aço, com temperaturas entre a temperatura ambiente e 700°C, de forma a obter o efeito das tensões residuais neste mecanismo de colapso.

Recentemente em 2004, Vila Real et al, [1.44], propõe a alteração do método de cálculo da verificação da encurvadura lateral a temperaturas elevadas, presente no Eurocódigo 3 parte 1.2, com base nas alterações da versão de 2003 do Eurocódigo 3 parte 1.1 à temperatura ambiente. A proposta vem diminuir o excesso de segurança existente em alguns carregamentos.

1.3- Sumário dos capítulos

No capítulo 2 é apresentado o fenómeno de instabilidade por encurvadura lateral à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Para a temperatura ambiente é apresentado o método de cálculo do momento crítico elástico baseado na equação da

energia, e as equações diferenciais de equilíbrio. É feita a descrição do dimensionamento à encurvadura lateral segundo o Eurocódigo 3 parte 1.1. É apresentado o comportamento a temperaturas elevadas, dando ênfase aos diferentes domínios de verificação de segurança ao fogo, presentes no Eurocódigo 3 Parte 1.2. São apresentados os mecanismos de transferência de calor por convecção, radiação e condução. É também efectuada a forma de cálculo da temperatura de um perfil exposto à acção do fogo, sendo proporcional ao factor de massividade do mesmo.

O capítulo 3 trata da caracterização das propriedades térmicas e mecânicas do material a temperaturas elevadas. É apresentada a variação destas propriedades com a temperatura. São apresentados resultados dos ensaios experimentais em provetes para a caracterização do aço depois de submetidos a temperaturas elevadas. Os provetes são submetidos a uma taxa de aquecimento de 800 [°C/h] e estabilizados a diferentes temperaturas, sendo sujeitos a diferentes condições de arrefecimento. Para condições de temperatura distintas são, posteriormente, executados ensaios de resistência, de dureza, análises metalográficas e medição das tensões residuais.

No capítulo 4 é apresentado o processo experimental e os ensaios experimentais efectuados. O estudo inicia com a caracterização da resistência do material dos perfis a ensaiar e das imperfeições existentes. Os ensaios são realizados no domínio da temperatura, em vigas com apoios de forquilha e de comprimento entre 1,5 [m] e 4,5 [m]. O carregamento mecânico é constante, correspondendo a aproximadamente um grau de utilização de 60%, e a temperatura segue uma taxa de aquecimento de 800 [°C/h]. Durante os ensaios são medidos os deslocamentos laterais e vertical a meio vão da viga, o que permite a obtenção da temperatura crítica, no instante do colapso.

No capítulo 5 são apresentados os estudos numéricos por elementos finitos, utilizando os programas Ansys e SAFIR. A discretização é feita pela superfície média do perfil com elementos de casca, introduzindo imperfeições geométricas e tensões residuais. O carregamento mecânico aplicado satisfaz o grau de utilização pretendido, sendo aplicada uma distribuição de temperatura uniforme na viga, sendo constante na espessura dos elementos de casca. É apresentada uma análise paramétrica dos factores que influenciam a temperatura crítica de vigas sujeitas à encurvadura lateral, como por exemplo, a influência das imperfeições, influência do diagrama de momentos e do grau de utilização. Os resultados numéricos da temperatura crítica são comparados com os obtidos experimentalmente.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões retiradas do estudo efectuado e apresentados alguns tópicos que carecem mais desenvolvimento.

1.4- Referências

- [1.1]. Kaitila, O., “Cold- Formed Steel Structures in Fire Conditions”, Seminar on Steel Structures, Helsinki University of Tecnology, 2000.
- [1.2]. Corus Construction & Industrial, “Fire resistance of steel framed buildings”, 2001.
- [1.3]. Bailey, C. G.; Burgess, I. W., Plank, R. J.; “Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings”, Fire Safety Journal, Vol. 26, pp 273-293, 1996.
- [1.4]. CEN ENV 1993-1-2; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”; 1995.
- [1.5]. ECCS N° 89, “Fire Resistance of Steel Structures”, March, 1996.
- [1.6]. Wagner, R.; “Torsion and Buckling of open sections”, National Advisory Committee for Aeronautics, Thecnical Memorandum N° 807, October 1936.
- [1.7]. Timoshenko, Stephen P; Gere, J.M.; “Theory of elastic stability”; McGraw-Hill international editions, 2nd edition; New York; 1961.
- [1.8]. Trahair, N.S.; “Lateraly unsuported beams”, Engineering Structures, Vol. 18, N° 10, pp 759-768, 1996.
- [1.9]. Flint, A.R.; “The stability and strength of stocky beams”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, Issue 2, pp 90-102, 1953.
- [1.10]. Trahair, N. S.; “Deformations of geometrically imperfect beams”; Journal of Structural Division, proceedings of the ASCE; ST 7, pp. 1475, 1496; July; 1969.
- [1.11]. Nethercot, D.A.; “The Influence of end support conditions on the stability of transversely loaded beams”, Building science, Vol. 7, Issue 2, pp 87-94, 1972.
- [1.12]. Pi, Young L.; Trahair, N. S.; “Prebuckling deflections and lateral Buckling. I: Theory”, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, n° 11, 2949-2966, 1992.
- [1.13]. Pi, Young L.; Trahair, N. S.; “Prebuckling deflections and lateral Buckling. II: Theory”, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, n° 11, 2967-2985, 1992.
- [1.14]. Trahair, N. S.; “Flexural Torsional Buckling of Structures”; E & FN SPON; USA; 1993.
- [1.15]. Greiner, R.; Salzgeber, G.; Ofner, R.; “New lateral torsional buckling curves χ_{LT} - numerical simulations and design formulae”; ECCS TC8 report 30; June, 2000.
- [1.16]. Greiner, R.; Ofner, R.; Salzgeber, G.; “TC8 – Proposal of level 1- formulae for prEN 1993-1-1”, July, 2001.

-
- [1.17]. CEN prEN 1993-1-1; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Stage 49 – draft; May 2003.
- [1.18]. Horne, M. R.; Morris, L. J.; “Preliminary investigation into effect of fire on portal frame behaviour”, Report to Constrado, 1973.
- [1.19]. Pettersson, O.; Witteveen, J.; “On the fire resistance of structural steel elements derived from standard fire tests or by calculation”, Fire Safety Journal, Vol. 2, Issue 1, pp 73-87, 1980.
- [1.20]. Smith, C.I.; Kirby, B.R.; Lapwood, K.J.; Cunningham, A.P.; “Preston, R.R.; The reintegration of fire damaged steel framed structures”; Fire Safety Journal, Vol. 4, Issue 1, pp 21-62, 1981.
- [1.21]. Kruppa J.; “Some results on the fire behavior of external steel columns”, Fire Safety Journal, Vol. 4, Issue 4, pp 247-257, 1981.
- [1.22]. Klingsch, W.; “Fire resistance of solid steel columns”, Fire Safety Journal, Vol. 4, Issue 4, pp 237-242, 1981.
- [1.23]. Rubert, A.; Schaumann, P.; “Structural steel and plane frame under fire action”, Fire Safety Journal, Vol. 10, Issue 3, pp 173-184, 1986.
- [1.24]. Rubert, A.; Schaumann, P.; “Critical temperatures of steel columns exposed to fire”, Fire Safety Journal, Vol. 13, Issue 1, pp 39-44, 1988.
- [1.25]. Melinek, S.J.; “Prediction of the fire resistance of insulated steel”, Fire Safety Journal, Vol. 4, Issue 3, pp 127-134, 1989.
- [1.26]. Burgess, I. W.; Olawale, A.O.; Plank, R.J.; “Failure of steel columns in fire”, Fire Safety Journal, Vol. 18, Issue 2, pp 183-201, 1992.
- [1.27]. Franssen, J.-M.; Dotreppe, J.-C.; “Fire resistance of columns in steel frames”, Fire Safety Journal, Vol. 19, Issue 2-3, pp 159-175, 1992.
- [1.28]. Cabrita Neves, I.; “The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation”, Fire Safety Journal, Vol. 24, Issue 3, pp 211-227, 1995.
- [1.29]. Rodrigues, J.P.; Cabrita Neves, I., Valente, J.C.; “Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation”, Fire Safety Journal, Vol. 35, Issue 2, pp 77-98, 2000.
- [1.30]. Burgess, I. W.; El-Rimawi, J.; Plank, R. J.; “Studies of the behaviour of steel beams in fire”, J. Constructional Steel Research, 19, 285-312, 1991.
- [1.31]. Bailey, C. G.; Burgess, I. W., Plank, R. J.; “The Lateral - Torsional Buckling of Unrestrained Steel Beams in Fire”, J. Constructional Steel Research, 36 (2), 101-119, 1996.
- [1.32]. Tide, R. H. R.; “Integrity of structural steel after exposure to fire”, Engineering Journal, 1998.
- [1.33]. Rotter, J.M.; Usmani, A.S.; “Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects”, Structures in Fire - First International Workshop, September, 2000.
- [1.34]. Toh, W. S.; Tan, K. H.; Fung, T. C.; “Strength and Stability of steel frames in fire: Rankine approach”, Journal of Structural Engineering, vol. 127, N° 4, Abril 2001.

-
- [1.35]. Sha, W.; Kirby, B.R.; Kelly, F.S.; “The behaviour of structural steels at elevated temperatures and the design of fire resistant steels”, *Materials Transactions*, Vol. 42, Nº 9, pp. 1913-1927, 2001.
- [1.36]. Yin, Y. Z.; Wang, Y. C.; “Numerical simulations of the effects of non-uniform temperature distributions on lateral torsional buckling resistance of steel I-beams”, *J. Constructional Steel Research*, 59, pp 1009-1033, 2003.
- [1.37]. Vila Real P. M.; Cazeli, R.; Simões da Silva, L.; Santiago, A.; Piloto, P.; “The effect of residual stresses in lateral torsional buckling of steel I-beams at elevated temperature”, *J. Constructional Steel Research*, vol. 60, 3-5, pp 783-793, 2003.
- [1.38]. Franssen, J.-M.; “Etude du comportement au feu des structures mixtes acier-beton”, *These de Doctorat, Belgique, Universite de liège*, 1987.
- [1.39]. Franssen, J.-M.; “The unloading of building materials submitted to fire”, *Fire Safety Journal*, Vol. 16, pp 213-237, 1990.
- [1.40]. Piloto, P.A.G.; “Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo” – Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica; Porto; Portugal; Setembro, 2000.
- [1.41]. Vila Real P. M.; Franssen, J.-M.; “Lateral buckling of steel I beams under fire conditions – comparison between the Eurocode 3 and the SAFIR code”, *Internal Report Nº 99/02, Institute of Civil Engineering – Service Ponts et Charpents – of the University of Liège*, 1999.
- [1.42]. Vila Real P. M.; Franssen, J.-M.; “Numerical modeling of lateral buckling of steel I beams under fire conditions – comparison with Eurocode 3”, *J. Fire Protection Eng*, Vol. 11 (2), pp. 112-128, 2001.
- [1.43]. Vila Real P. M.; Piloto, P.; Franssen, J.-M.; “A new proposal of a simple model for the lateral-torsional buckling of unrestrained steel I-beams in case of fire: experimental and numerical validation”, *J. Constructional Steel Research*, vol. 59, pp 179-199, 2003.
- [1.44]. Vila Real P. M.; Lopes, N.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.-M.; “Lateral torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal”, *Computers & Structures*, vol. 82, pp 1737-1744, 2004.