

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE UMA ESTRUTURA EM AÇO INOXIDÁVEL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Lopes, N. ¹; Vila Real, P. M. M.²; Piloto, P.³; Mesquita, L.⁴; Simões da Silva, L. ⁵

RESUMO

O aço inoxidável tem reconhecidamente uma resistência ao fogo superior ao aço carbono pelo que é de prever uma crescente utilização deste tipo de aço para fins estruturais. De facto, embora mais caro que o aço carbono, o aço inoxidável pode conduzir a estruturas competitivas em virtude de necessitarem de uma menor quantidade de material de protecção térmica ou mesmo, em alguns casos, não ser necessária protecção contra incêndio, como sucede na estrutura apresentada neste artigo.

Com o objectivo de modelar pelo Método dos Elementos Finitos o comportamento de uma estrutura porticada de um edifício em aço inoxidável em situação de incêndio, introduziu-se a sua lei constitutiva no programa SAFIR, um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, especialmente desenvolvido na Universidade de Liège para estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo. Neste programa as propriedades térmicas e mecânicas do aço são função da temperatura, de acordo com o Eurocódigo 3.

Compara-se o comportamento da estrutura em aço inoxidável 1.4301 (também conhecido como 304) com o comportamento que teria se a estrutura fosse em aço carbono S235 e realçam-se os benefícios da utilização do aço inoxidável resultantes da sua maior resistência ao fogo.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do aço inoxidável para fins estruturais tem estado reservada a projectos de elevado valor arquitectónico em que o carácter inovador das soluções adoptadas constitui

¹ Assistente, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

² Prof. Catedrático, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

³ Prof. Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mecânica Aplicada, 5300 Bragança.

⁴ Assistente, Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mecânica Aplicada, 5300 Bragança.

⁵ Prof. Catedrático, Universidade de Coimbra, Dep. Engenharia Civil, 3030 Coimbra.

factor da sua valorização. O alto custo inicial deste tipo de aço, aliado à existência de regras de dimensionamento limitadas, o número reduzido de secções disponíveis e a falta de conhecimento dos benefícios adicionais da sua utilização como material estrutural, são alguns dos motivos que levam os projectistas a não o utilizar^[1]. No entanto, uma análise mais cuidada evidencia uma boa competitividade do aço inoxidável relativamente ao aço carbono convencional.

A maior vantagem do aço inoxidável reside na sua resistência à corrosão. No entanto, a sua aparência estética, a facilidade de manutenção, a durabilidade e os seus reduzidos custos de ciclo de vida são também características relevantes. É conhecido que a resistência ao fogo do aço inoxidável é superior à do aço carbono vulgarmente utilizado na construção. A questão de se saber se elementos estruturais em aço inoxidável podem ser usados em edifícios, sem protecção contra incêndio, é de elevada importância porque as considerações estéticas são normalmente as consideradas para a escolha do aço inoxidável em estruturas deste tipo. Eliminar a protecção contra incêndio das estruturas resultará em custos de construção mais baixos, períodos de construção inferiores, uma utilização mais eficaz dos espaços interiores, melhor ambiente de trabalho e uma melhor aparência estética do edifício. Por outro lado, o custo do ciclo de vida das estruturas em aço inoxidável não protegidas é menor do que o das estruturas em aço carbono protegido.

Tendo em conta apenas considerações de ordem económica seria pouco provável que o aço inoxidável fosse escolhido em detrimento do aço carbono devido à sua maior resistência ao fogo. No entanto, para projectistas que valorizem o aspecto e a durabilidade do aço inoxidável, o benefício adicional de possuir uma resistência ao fogo significativa sem protecção, pode inverter a escolha a favor deste material. De facto o aço inoxidável pode ser uma excelente solução, em aplicações onde a boa resistência à corrosão é requerida a par de uma boa resistência ao fogo.

Embora o uso do aço inoxidável na construção esteja a aumentar, é ainda necessário desenvolver o conhecimento do seu comportamento estrutural.

O aço inoxidável é altamente resistente à corrosão na maior parte dos ambientes agressivos e por essa razão tem sido utilizado em estruturas localizadas à beira mar, em instalações nucleares, químicas, petrolíferas, de águas residuais e de armazenamento de alimentos. A sua resistência à corrosão resulta de uma camada transparente e bem aderente de óxido rica em crómio que se forma espontaneamente à superfície na presença do ar ou de outro qualquer ambiente oxidante. Caso se risque, ou tenha algum dano por corte, a camada superficial regenera-se imediatamente na presença de oxigénio.

Devido à superior resistência ao fogo do aço inoxidável relativamente ao aço carbono, e embora mais caro que este último, o aço inoxidável pode conduzir a estruturas competitivas em virtude de necessitarem de uma menor quantidade de material de protecção térmica.

O aço inoxidável apresenta à temperatura ambiente, contrariamente ao aço carbono, um comportamento não linear, mesmo para reduzidos valores da tensão. Por outro lado, não tem uma tensão cedência claramente definida, sendo usualmente adoptado um limite convencional de elasticidade correspondente a uma deformação de 0,2%. A tabela 1 compara as características mecânicas do aço inoxidável 1.4301 (também conhecido como 304), utilizado na estrutura analisada neste artigo, com o aço S235, à temperatura ambiente.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados à temperatura ambiente.

Propriedades mecânicas	Aço carbono S235	Aço inoxidável 1.4301
Tensão de rotura (MPa)	360	520
Tensão convencional de cedência (MPa)	235	210
Extensão após rotura	> 15%	40%

Na figura 1 estão representadas as leis constitutivas do aço carbono S 235 e do aço inoxidável 1.4301 à temperatura ambiente e a 600 °C [2, 3].

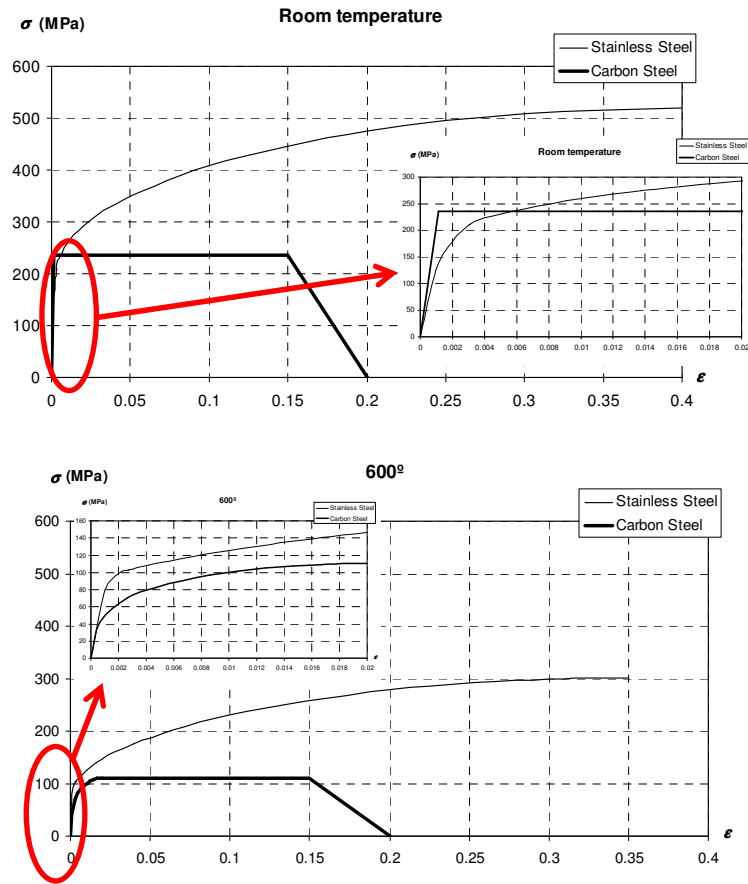


Fig. 1 - Leis constitutivas do aço carbono e do aço inoxidável à temperatura ambiente e a 600° C.

A figura 2 ilustra as diferenças existentes entre a condutividade térmica e o calor específico do aço carbono e do aço inoxidável. Embora o aço inoxidável tenha uma condutividade térmica inferior à do aço carbono, o que faria supor velocidades de aquecimento mais lentas que no aço carbono, como o calor específico deste último é superior não há grandes diferenças na evolução das temperaturas nos dois materiais como se poderá verificar na figura 7.

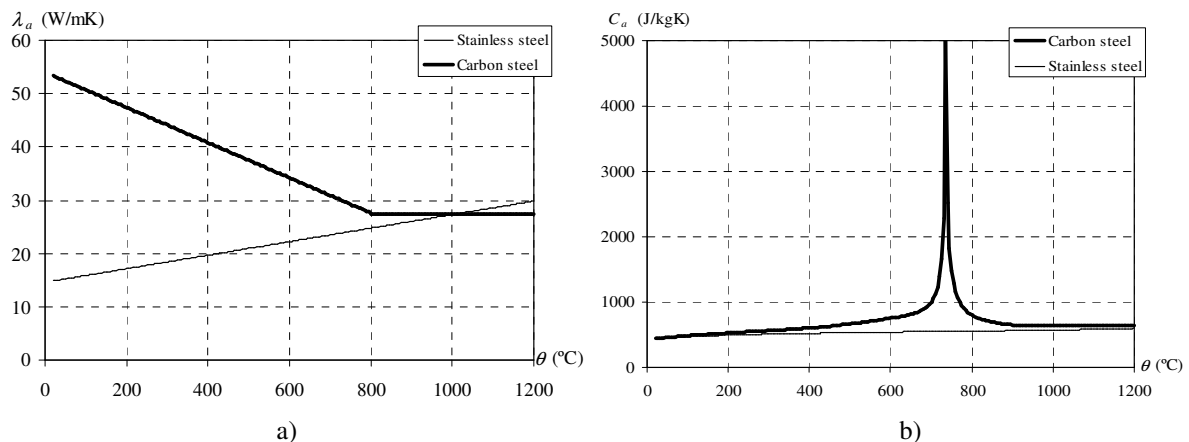


Fig. 2 - Condutividade térmica a) e calor específico b) do aço carbono e do aço inoxidável.

Neste artigo faz-se o cálculo da resistência ao fogo de uma estrutura metálica porticada, com dois vãos e três pisos como se mostra na figura 3. Como se verá, a resistência ao fogo desta estrutura em aço carbono S 235 é inferior à resistência regulamentar^[4], no entanto se a estrutura for em aço inoxidável 1.4301 essa resistência é largamente excedida.

Trata-se de um edifício do tipo comercial situado a Nordeste de Portugal, a uma altitude de 700m, analisado numa referência anterior^[5]. Para ter em conta os efeitos das imperfeições de montagem, possíveis excentricidades e até imperfeições geométricas, introduziu-se, de acordo com a , Parte 1.1^[6] do Eurocódigo 3, uma imperfeição inicial, à qual corresponde um ângulo de 0.0033rad. Assim a estrutura apresenta uma inclinação para a direita de cerca de 0.01m por cada 3m de altura.

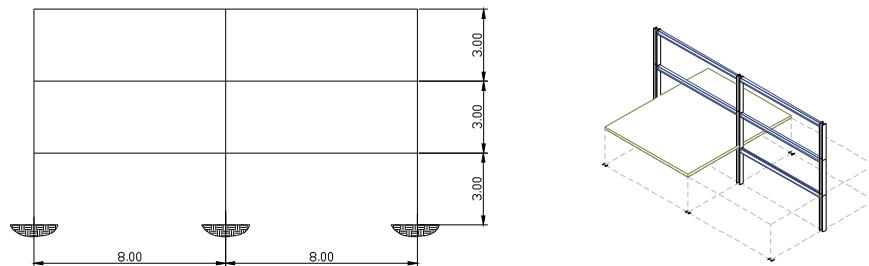


Fig. 3 – Representação esquemática da estrutura bidimensional, com 5m de afastamento entre pórticos.

2. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Existem actualmente vários programas de cálculo automático para análise da resistência ao fogo das estruturas, que vão desde programas baseados nos *métodos simplificados de cálculo* definidos nos Eurocódigos, até programas mais complexos de análise não - linear, baseados no método dos elementos finitos e que se incluem nos chamados *métodos avançados de cálculo* referidos nos Eurocódigos. Entre estes últimos encontra-se o programa SAFIR^[7] utilizado neste trabalho, que é um código de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège vocacionado para a análise de estruturas sujeitas à acção do fogo.

2.1 O programa SAFIR

O programa SAFIR é constituído por dois módulos de cálculo distintos, um para a análise do comportamento térmico da estrutura e outro para a análise do seu comportamento mecânico. Assim, numa primeira fase calcula a evolução do campo não uniforme de temperaturas, para cada secção tipo existente na estrutura, e numa fase posterior o módulo mecânico do programa lê estas temperaturas e faz o cálculo do comportamento mecânico da estrutura em regime transiente.

2.1.1 Análise do comportamento térmico

O programa SAFIR permite fazer a análise do comportamento térmico das estruturas quer utilizando elementos sólidos tridimensionais (3D), quer utilizando elementos planos bidimensionais (2D). Os elementos sólidos são lineares de oito nós e os elementos planos, também lineares, podendo ser triangulares de 3 nós ou quadriláteros com 4 nós.

2.1.2 Análise do comportamento mecânico

A análise transiente do comportamento mecânico das estruturas utiliza, como se disse, os resultados da análise térmica previamente efectuada.

Para além do elemento sólido estão também disponíveis no SAFIR elementos de barra e de viga, sendo possível com estes dois últimos modelar estruturas reticuladas tridimensionais.

O elemento de viga baseia-se na hipótese de Bernoulli, em que as secções planas antes da deformação se mantêm planas depois da deformação e o efeito do esforço transversal não é tido em consideração. Por outro lado este elemento não contempla encurvadura local, razão pela qual se devem apenas utilizar perfis com secções da Classe 1 e da Classe 2 de acordo como são definidas no Eurocódigo 3^[6].

A secção recta dos elementos é discretizada através de elementos finitos aos quais correspondem fibras, sendo a temperatura, a deformação, a tensão e as restantes propriedades do material consideradas constantes em cada fibra. A discretização do elemento de viga através do modelo de fibras, permite a consideração de tensões residuais^[8].

O critério de colapso da estrutura é definido como sendo o instante em que a sua matriz de rigidez deixa de ser definida positiva, não sendo mais possível estabelecer o equilíbrio da estrutura. O programa pode utilizar o método do comprimento de arco, “*arc-length*”, para resolver os problemas de ruína local que por vezes surgem. De facto em estruturas hiperstáticas pode acontecer que a ruína de um dos seus elementos não corresponda ao colapso global da estrutura. É possível que, para além do instante em que ocorre a ruína local, parte dos esforços que não pode mais ser suportada pelo elemento em questão seja redistribuída pelos outros elementos da estrutura, encontrando esta uma nova posição de equilíbrio.

3. ACÇÕES EM ESTRUTURAS SUJEITAS A FOGO

3.1 Acções mecânicas

O valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio, $E_{f,d,t}$, deve ser obtido utilizando a seguinte combinação de acidente definida no EN 1990^[9]:

$$\sum \gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (2)$$

onde

- γ_{GA} - representa o coeficiente de segurança parcial para as acções permanentes em situação de acidente, o qual deve tomar o valor unitário ($\gamma_{GA} = 1$);
- G_k - representa o valor característico das acções permanentes;
- $Q_{k,1}$ - representa o valor característico da acção variável principal ou dominante;
- $\psi_{1,1}$ - representa o coeficiente de combinação associado à acção variável principal ou dominante^[9];
- $\psi_{2,i}$ - representa o coeficiente de combinação associado às restantes acções variáveis^[9];
- $A_d(t)$ - representa o valor de cálculo da acção resultante da exposição ao fogo e que se traduz no efeito da temperatura sobre as propriedades dos materiais e nas

acções indirectas de incêndio a que correspondem os esforços resultantes das restrições às dilatações térmicas.

Para a quantificação das acções, os valores da sobrecarga a considerar foram obtidos do Eurocódigo 1, Parte 1-1^[10]. A acção do vento e da neve foi quantificada tendo em atenção a localização e implantação do edifício de acordo com o estipulado no Eurocódigo 1 respectivamente na Parte 1-4^[11] e na Parte 1-3^[12].

Neste trabalho apenas será apresentada a análise da estrutura correspondente à combinação de acções em que o vento figura como acção variável principal. A figura 4 mostra o carregamento correspondente a esta combinação de acções.

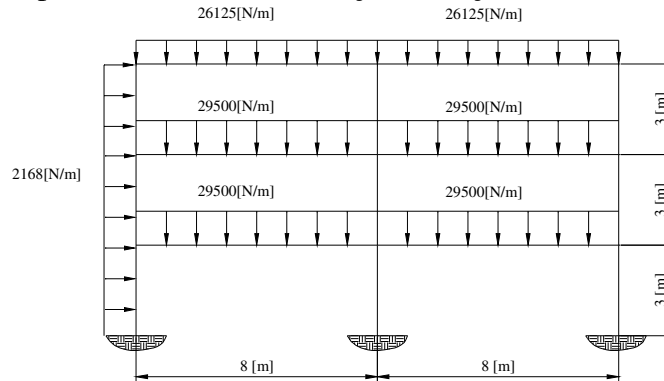


Fig. 4 – Carregamento correspondente à combinação de acções em que o vento é a acção variável dominante.

3.2 Acções térmicas

No que diz respeito às acções térmicas a parte 1-2 do Eurocódigo 1^[13] estabelece que a temperatura de incêndio pode ser considerada em função de curvas nominais tempo - temperatura ou sob a forma de curvas paramétricas.

As curvas nominais são curvas convencionais que podem ser definidas por uma fórmula simples e que não dependem da dimensão ou do tipo dos edifícios. São assim definidas três curvas nominais:

1. Curva de incêndio padrão ISO 834;
2. Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores;
3. Curva de incêndio de hidrocarbonetos.

As curvas de incêndio paramétricas distinguem-se das anteriores por possuírem fase de arrefecimento. Estas curvas pretendem traduzir de modo mais apropriado os incêndios reais e têm em consideração os principais parâmetros que influenciam a extensão e o desenvolvimento dos incêndios, ou seja, a dimensão do edifício, o factor de abertura do compartimento de incêndio e a densidade de carga de incêndio.

Neste trabalho utilizou-se, a curva de incêndio padrão ISO 834, cuja expressão analítica é dada por^[13]:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

onde

θ_g representa a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em °C;

t representa o tempo em min.

5. CASO ESTUDADO

Pretende-se fazer o cálculo da resistência ao fogo da estrutura metálica já apresentada na figura 3, quando sujeita a fogo apenas no compartimento 4 como mostra a figura 5.

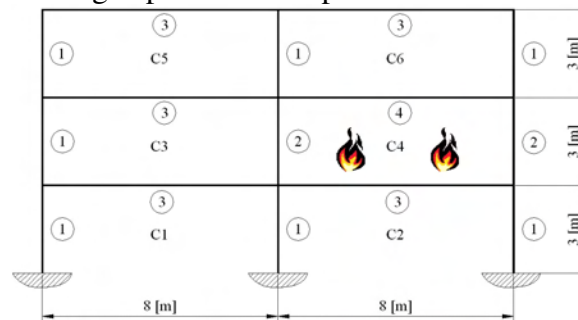


Fig. 5 – Estrutura com a indicação das várias secções tipo e a localização do incêndio.

Para a estrutura em aço carbono utilizou-se aço do tipo S235, tendo o dimensionamento da estrutura à temperatura ambiente conduzido à escolha de perfis IPE 450 para as vigas e HEA 300 para os pilares. Para a estrutura em aço inoxidável utilizou-se um aço da classe 1.4301 que tem como tensão de cedência 210 MPa, ou seja próximo da tensão de cedência do aço carbono escolhido. As secções transversais dos pilares e das vigas foram as mesmas da estrutura em aço carbono.

Na figura 5 estão numerados os diversos tipos de elementos estruturais de acordo com a solicitação térmica a que estão sujeitos. Assim, por exemplo, os elementos do tipo 2 correspondem a pilares com aquecimento num dos banzos. A secção do tipo 4 corresponde a vigas com aquecimento em três lados. Na figura 6 encontram-se ilustrados estes dois casos.

O módulo térmico do programa SAFIR permite calcular, como se disse, a evolução do campo de temperaturas ao longo do tempo, fazendo uma análise não-linear, uma vez que as propriedades térmicas dos materiais dependem da temperatura e a própria condição de fronteira radiativa é também não - linear.



Fig. 6 – a) Viga sujeita a fogo em três lados; b) Pilar sujeito a fogo num dos lados.

O campo de temperaturas na secção transversal dos perfis não é uniforme, como se obteria se se utilizasse a equação simplificada de condução de calor, preconizada no Eurocódigo 3, onde se assume que o campo de temperaturas é uniforme na secção recta dos perfis, em virtude da elevada condutividade térmica do aço. Como facilmente se compreende, podem ocorrer elevados gradientes térmicos nas secções em análise, os quais podem provocar significativas alterações nos esforços da estrutura.

A figura 7 mostra a evolução da temperatura num ponto da secção transversal das vigas. Pode verificar-se que a curva de aquecimento do aço inoxidável acompanha em grande parte da sua extensão a curva de aquecimento do aço carbono com excepção do intervalo de temperaturas entre os 600 °C e os 900 °C. Neste intervalo verifica-se um atraso na curva do

aço carbono que é devido à mudança de fase metalúrgica que é tida em conta através do pico no valor do calor específico deste aço e que não existe no aço inoxidável, como se pode ver na figura 2.

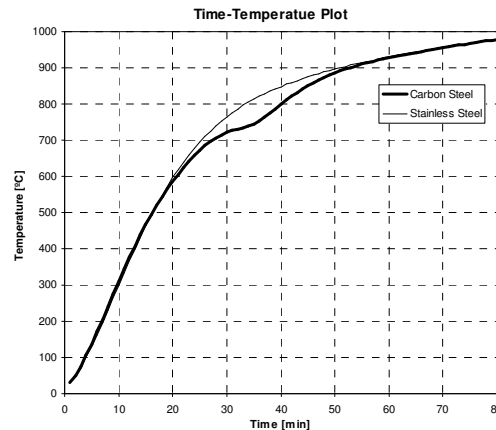


Fig. 7 – Evolução da temperatura num nó da secção transversal da viga 4.

Depois de efectuar o cálculo térmico, procede-se, como se disse, ao cálculo estrutural. A discretização da estrutura utilizada é a representada na figura 8.

As temperaturas previamente calculadas nos elementos estruturais, são numa segunda fase lidas e utilizadas na parte de cálculo estrutural do programa SAFIR. A determinação dos deslocamentos e dos esforços é determinada através de um processo incremental, durante o incêndio, até ao momento em que já não é possível estabelecer o equilíbrio. Este instante corresponde à resistência ao fogo da estrutura.

Os elementos finitos utilizados são do tipo Euler Bernoulli, apresentando 3 nós, com um nó central apenas para contemplar a não-linearidade do deslocamento axial^[14]. Assim, e para o caso de viga bidimensional, existem dois deslocamentos e uma rotação nos nós das extremidades, em conjunto com o referido grau relativo ao deslocamento axial, num total de 7 graus de liberdade.

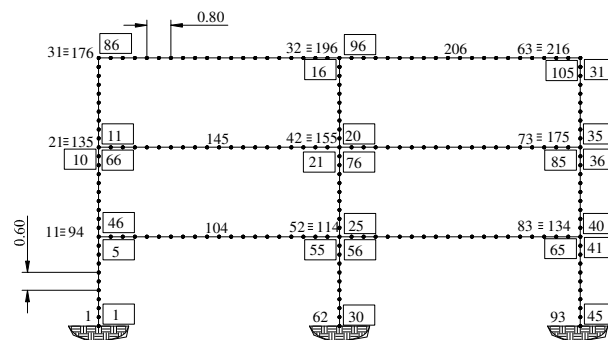


Fig. 8 – Discretização da estrutura. Numeração dos nós e dos elementos (em caixa).

O pós-processador Diamond 2004 possibilita também a visualização da deformada da estrutura, bem como os diagramas de esforços. A figura 9 apresenta a deformada, diagramas de esforços axiais e diagramas de momentos flectores da estrutura em aço carbono e da estrutura em aço inoxidável, no instante de colapso. Nesta figura consegue-se observar que no instante de colapso a deformada da estrutura em aço inoxidável é superior à da estrutura em aço carbono, o que pode ser justificado pelo facto de a lei constitutiva do aço inoxidável ter uma extensão última superior à do aço carbono, tal como se ilustra na figura 1. Observa-se também que o diagrama de momentos flectores apresenta dissemelhanças nas duas estruturas.

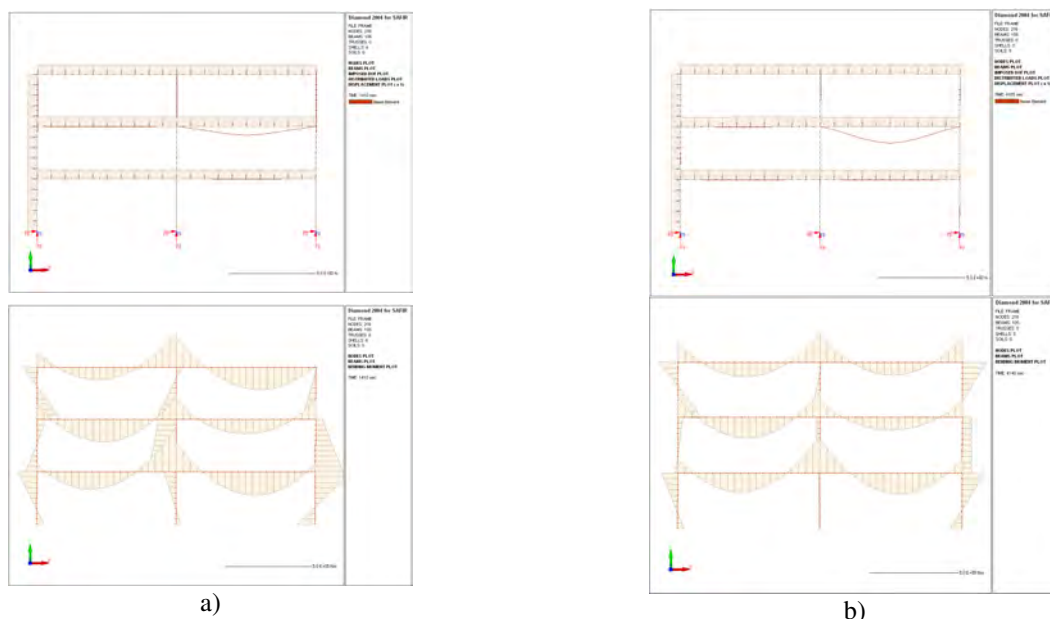


Fig. 9 – Resultados obtidos no instante de colapso; a) Estrutura em aço carbono; b) Estrutura em aço inoxidável (factor de escala para os deslocamentos de 1).

A estrutura em aço carbono atingiu o colapso ao fim de 1410 segundos (23,5 minutos) enquanto que a estrutura em aço inoxidável demorou 4140 segundos (cerca de 1 hora e 9 minutos) para entrar em colapso, a que corresponde uma resistência ao fogo cerca de 3 vezes superior à da estrutura em aço carbono.

A resistência ao fogo da estrutura em aço carbono de 23,5 minutos, fica claramente abaixo dos valores regulamentares^[4], pois de acordo com o anexo sobre medidas de segurança contra riscos de incêndio a aplicar a estabelecimentos comerciais cuja altura não ultrapasse os 9m, no seu ponto 3.2.1. sobre características construtivas, explicita que a resistência ao fogo da estrutura deve ser, pelo menos, de 30 minutos. Assim com a resistência evidenciada pela estrutura em aço inoxidável (mais de 1 hora) não seria necessária qualquer protecção contra incêndio.

6. CONCLUSÕES

Calculou-se a resistência ao fogo de uma estrutura em aço carbono e em aço inoxidável. Em ambos os casos se considerou que a estrutura não tinha protecção contra incêndio.

O método de análise adoptado enquadra-se nos chamados *métodos avançados de cálculo* preconizados nos Eurocódigos, tendo sido utilizado um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège, especialmente destinado ao estudo do comportamento das estruturas em situação de incêndio. Para que este programa pudesse analisar estruturas em aço inoxidável foi necessário introduzir no código as alterações necessárias a poder contemplar a lei constitutiva deste material, bem como as suas propriedades térmicas, em função da temperatura.

Concluiu-se que a estrutura estudada em aço inoxidável 1.4301 possui uma resistência ao fogo 3 vezes superior à da mesma estrutura em aço carbono S235. Relativamente à qualificação regulamentar a estrutura em aço carbono é da classe de resistência ao fogo EF15, enquanto que a estrutura em aço inoxidável é da classe EF60. Este aumento da resistência permite que a estrutura em aço inoxidável não necessite de protecção contra incêndio, o que aumenta a competitividade do aço inoxidável como material estrutural permitindo que o aço

fique à vista, o que muitas vezes do ponto de vista arquitectónico é decisivo na escolha deste tipo de aço na construção. Deve no entanto notar-se que os resultados do caso prático apresentado neste artigo devem ser encarados como uma avaliação preliminar. De facto, falta comprovar qual seria o comportamento da estrutura em aço carbono se se tivesse considerado a lei constitutiva alternativa, preconizada no Anexo A da parte 1.2 do EC3, que contempla o encruamento do aço. Muito embora esta lei não considere o encruamento para temperaturas superiores a 400 °C é de prever uma melhoria da resistência ao fogo da estrutura em aço carbono aqui analisada que falta confirmar.

Refira-se ainda que se escolheu o aço S235 por ser este o aço carbono com a tensão de cedência mais próxima da tensão limite convencional de elasticidade a 0.2% do aço inoxidável 1.4301. Por outro lado, numa perspectiva de avaliação económica comparativa entre os dois casos, será igualmente relevante comparar este aço inox com aço carbono S275 ou S355, cujos preços/kg são pouco superiores ao S235 e significativamente inferiores ao do aço inox.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Gardner, L., “The use of stainless steel in structures” Prog. Struct. Engng Mater., 2005.
- [2] prEN 1993-1-4, “Eurocode 3 - Design of Steel Structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels”, Setembro 2005.
- [3] EN 1993-1-2, “Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Abril 2005.
- [4] “Normas de Segurança contra Risco de Incêndio a aplicar a Estabelecimentos Comerciais (incluindo Anexo sobre Medidas de Segurança contra riscos de Incêndio a aplicar em estabelecimentos Comerciais)”, Dec. Lei nº 61/90 de 15 de Fevereiro.
- [5] Vila Real, P. M. M., Piloto, P. A. G., Franssen, J.-M., “Modelação Numérica do Comportamento de uma Estrutura Metálica Sujeita à Acção do Fogo – Análise de Vários Cenários de Incêndio”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, LNEC, pp. 23-32, Março de 2000.
- [6] EN 1993-1-1, “Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, Maio 2005.
- [7] J.-M. Franssen, “SAFIR. A Thermal/Structural Program Modeling Structures under Fire”, Proc. NASCC conf., American Inst. for Steel Constr., Baltimore, USA, 2003.
- [8] Vila Real, P., Cazeli, R., Silva, L., Santiago, A., Piloto, P., “The Effect of Residual Stresses in the Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams at Elevated Temperature”, Journal of Constructional Steel Research, ELSEVIER, 60/3-5, pp.783-793, 2004.
- [9] EN 1990, “Eurocode – Basis of structural design”, Abril 2002.
- [10] EN 1991-1-1, “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: Actions on Structures – Densities, self-weight, imposed loads for buildings”, Abril 2002.
- [11] EN 1991-1-4, “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions”, Abril 2005.
- [12] EN 1991-1-3, “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads”, Julho 2003.
- [13] EN 1991-1-2, “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire”, Novembro 2002.
- [14] Jean-Marc Franssen, “Contributions a la Modelisation des Incendies dans les Batiments et de Leurs Effects Sur les Structures”, Thèse présentée en vue de l’obtention du grade d’Agrégé de l’Enseignement Supérieur, Année académique 1997-1998, University of Liege, Belgium.