



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Desempenho estrutural do edifício FRAMEUP em situação de incêndio**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

**Tiago José Martins da Palma**

Orientadores

**Aldina Maria da Cruz Santiago**

**Rui António Duarte Simões**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2015**

## Agradecimentos

Como não podia deixar de ser, as primeiras palavras vão para as pessoas que são mais importantes, os meus pais, Martinho Palma e Hortência Martins pois sem o apoio deles não tinha sido possível esta minha jornada na Universidade de Coimbra, sem eles não teria tido oportunidade de estudar e criar raízes nesta cidade. Não menos importante é agradecer à minha irmã Patrícia Palma que sempre apoia e motiva para ser mais e melhor no que faço.

Em segundo agradeço à Professora Doutora Aldina Santiago e ao Professor Doutor Rui Simões, que ao longo deste semestre sempre estiveram disponíveis para me orientar e ajudar na realização desta tese. Agradeço também à Professora Cécil Harenza que tão gentilmente cedeu o seu tempo para me dar pequenas formações de Abaqus e tirar dúvidas sempre que precisei.

Quero agradecer à minha namorada Rita Castro, que sempre esteve disponível para me apoiar e ajudar, nos momentos mais complicados que passei ao longo destes meses.

Quero agradecer aos meus colegas de casa André Reis, João Duarte e Pedro Pires, pois ao longo deste tempo muitas foram as vezes que me virama desesperar com a tese e me apoiaram.

Por último agradecer a todos os grandes amigos, que fiz ao longo destes anos, que passei em Coimbra e a todos aqueles que sempre fizeram parte da minha vida.

## Resumo

Os perfis metálicos de secção tubular (circular, quadrada ou retangular) apresentam enormes vantagens do ponto de vista estrutural, de durabilidade e de resistência contra incêndios quando comparados com os perfis de igual área de secção transversal, em secção aberta.

No âmbito de um projeto europeu (FRAMEUP) está em curso no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra um estudo que envolve, diversas áreas de estudo, entre elas a avaliação do desempenho de um edifício em estrutura reticulada, composta por vigas e pilares de secção tubular, sob ações de acidente, sismo e fogo.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta tese consiste na avaliação do desempenho, recorrendo a programas de cálculo numérico, do referido edifício quando submetido à ação de um incêndio num dos seus compartimentos.

Será efetuada uma avaliação paramétrica, fazendo variar a localização do compartimento de incêndio. Esta análise tem por base o Eurocódigo 0 que define a combinação de ações de situações de acidente, o Eurocódigo 1 parte 1-2 onde são definidas as ações em estruturas expostas ao fogo, sendo neste definidas as curvas de incêndio paramétricas e por último o Eurocódigo 3 parte 1-2 que define as regras gerais de verificação da resistência ao fogo.

## **Abstract**

The metal profiles with tubular section (circular, square or rectangular) have enormous advantages from a structural point of view, durability and fire resistance compared with equal cross-sectional area profiles, at an open section.

As part of a European project (FRAMEUP) the Department of Civil Engineering (Science and Technology, Coimbra's University) is developing a study that involves several study areas, including the evaluation of building performance in lattice structure, composed of beams and tubular section pillars under earthquake and fire actions.

The work developed in this thesis is based on the performance evaluation, using numerical calculation programs of that building, when subjected to the action of fire at one of its compartments.

A parametric evaluation will be performed by changing the location of the fire compartment. This analysis is based on the Eurocode 0 that defines the combination of accident situations and actions, Eurocode 1 part 1-2 where the actions in fire-exposed structures are defined, which is also defined the parametric fire curves and, at last, the Eurocode part 3 1-2 laying down general rules to proof fire resistance.

## Índice

Simbologia.....	ix
Abreviaturas.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Construção metálica.....	1
1.2 Perfis tubulares .....	2
1.3 Enquadramento (projeto FRAMEUP) .....	3
1.4 Objetivo .....	6
1.5 <i>Software</i> .....	7
1.6 Estruturação da tese .....	8
2 Análise térmica.....	9
2.1 Introdução .....	9
2.2 Temperatura de incêndio no módulo .....	10
2.2.1 Curva paramétrica.....	11
2.2.2 Densidade de carga de incêndio .....	14
2.2.3 Modelação OZone .....	15
2.3 Temperatura nos perfis metálicos da estrutura principal .....	19
2.3.1 Evolução da temperatura no aço.....	19
2.3.2 Modelação Elefir-EN.....	21
3 Análise mecânica.....	24
3.1 Combinação de acidente .....	24
3.2 Modelação em Abaqus.....	25
3.3 Caso de estudo - fogo no módulo 1 .....	26
3.4 Caso de estudo - fogo no módulo 2 .....	27
3.5 Análise mecânica .....	27
3.5.1 Módulo 1 .....	29
3.5.2 Módulo 2 .....	31
4 Dimensionamento.....	33
4.1 Introdução .....	33
4.2 Domínio da resistência.....	34
4.2.1 Classificação das seções transversais .....	34
4.2.2 Vigas com seções transversais da Classe 1 ou da Classe 2 .....	34
4.2.3 Elementos com secções transversais das classes 1 ou 2, sujeitos a flexão composta com compressão .....	34
4.2.4 Temperatura crítica.....	37
4.3 Verificação.....	37
4.3.1 Elementos Avaliados .....	37

4.3.2	Pilar 5.....	40
4.3.3	Pilar 7.....	42
4.3.4	Viga 8 .....	44
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	47
	Referências bibliográficas .....	49
	Anexos.....	A-1
	A - Ações na estrutura .....	A-1
	B – diagramas de esforços e deslocamentos no final do incêndio no módulo 1.....	B.1
	C – Diagramas de esforços e deslocamentos no final do incêndio no módulo 2.....	C.1

## Índice de figuras

Figura 1.1 Ponte <i>Coalbrookdale</i> (CEAM-UFMG@, 2014).....	1
Figura 1.2 Ponte Pedro e Inês em Coimbra (Wikipédia@, 2015).....	2
Figura 1.3 Macaco hidráulico e esquema de vigas principais nos andares (FRAMEUP, 2013)3	
Figura 1.4 Último andar após primeira elevação (FRAMEUP, 2013).....	4
Figura 1.5 Estrutura com três andares (FRAMEUP, 2013).....	4
Figura 1.6 Planta dos vários andares da estrutura e planta ilustrativa dos interiores (FRAMEUP, 2013) (Monteiro, 2013) .....	5
Figura 1.7 Geometria e secções da estrutura completa (FRAMEUP, 2013).....	6
Figura 2.1 Curva de incêndio natural típica (Vila Real, 2003).....	9
Figura 2.2 Área do quarto (Monteiro, 2013) .....	16
Figura 2.3 Representação das paredes do módulo e respectivas dimensões (OZone). .....	16
Figura 2.4 Representação e numeração das camadas nas paredes de dentro para fora (OZone) .....	17
Figura 2.5 Materiais do pavimento (OZone). .....	17
Figura 2.6 Materiais do teto (OZone). .....	17
Figura 2.7 Materiais das paredes 1,2 e 3 do módulo (OZone). .....	17
Figura 2.8 Dimensões da abertura na parede 1 (OZone). .....	18
Figura 2.9 Tipo de ocupação do compartimento (OZone). .....	18
Figura 2.10 Curva paramétrica de temperatura dentro do compartimento (OZone). .....	19
Figura 2.11 Representação do incêndio no pilar .....	21
Figura 2.12 Curva de temperatura nos pilares e compartimento (Elefir EN).....	22
Figura 2.13 Curva de temperatura nas vigas e no compartimento (Elefir EN). .....	23
Figura 3.1 Vigas e pilares afetados pela variação de temperatura no módulo 1 (Abaqus). ....	26
Figura 3.2 Vigas e pilares afetados pela variação de temperatura no módulo 2 (Abaqus). ....	27
Figura 3.3 Eixos de referência local das vigas e pilares .....	28
Figura 3.4 Esforço axial (Abacus).....	28
Figura 3.5 Momento fletor em torno X local (Abaqus).....	28
Figura 3.6 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus).....	29
Figura 3.7 Deslocamento segundo x global (Abaqus).....	29
Figura 3.8 Deslocamento segundo Y global (Abaqus).....	29
Figura 3.9 Deslocamento segundo Z global (Abaqus) .....	29
Figura 3.10 Esforço axial (Abaqus).....	30
Figura 3.11 Momento fletor em torno de X local (Abaqus).....	30

Figura 3.12 Momento em torno de Y local (Abaqus).....	30
Figura 3.13 Deslocamento segundo X global (Abaqus).....	30
Figura 3.14 Deslocamento segundo Y global (Abaqus).....	31
Figura 3.15 Deslocamento segundo Z global (abaqus).....	31
Figura 3.16 Esforço axial (Abaqus).....	31
Figura 3.17 Momento fletor em torno de X local (Abaqus).....	31
Figura 3.18 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus).....	32
Figura 3.19 Deslocamento segundo X global (Abaqus).....	32
Figura 3.20 Deslocamento segundo Y global (Abaqus).....	32
Figura 3.21 Deslocamento segundo Z global (Abaqus) .....	32
Figura 4.1 Coeficientes de momento uniforme equivalente (CEN, 2010b) .....	36
Figura 4.2 Número dos elementos da envolvente dos módulos 1 e 2 .....	38
Figura 4.3 Diagrama de esforço axial e Momento fletor pilar 5 (Abaqus) .....	38
Figura 4.4 Diagrama de esforço axial pilar 7 (Abaqus) .....	39
Figura 4.5 Digrama de momento SM1 e SM2 do pilar 7 (Abaqus) .....	39
Figura 4.6 Diagrama SM1 Viga 8 (Abaqus) .....	40
Figura 4.7 Verificação da temperatura crítica do pilar 5 (domínio da temperatura) (Elefir EN) .....	41
Figura 4.8 Temperatura crítica pilar 5, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN) .....	41
Figura 4.9 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN).....	42
Figura 4.10 Cálculo da temperatura crítica em função do carregamento do pilar 7 (domínio da temperatura) (Elefir EN).....	43
Figura 4.11 Temperatura crítica pilar 7, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN) .....	43
Figura 4.12 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN).....	44
Figura 4.13 Cálculo da temperatura crítica para o carregamento atuante na viga 8 (domínio da temperatura) (Elefir EN).....	45
Figura 4.14 Temperatura crítica viga 8, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN) .....	45
Figura 4.15 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN).....	46

---

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 Definição de $t_{lim}$ .....	13
Tabela 2.2 Definição do tipo de ocupação .....	13
Tabela 3.1 Coeficientes $\psi_2$ .....	24
Tabela 3.2 Fator de redução para $E_a$ e $f_y$ em função da temperatura (CEN 2010b).....	25

## Simbologia

### Letras minúsculas latinas

$b$	— inércia térmica da parede envolvente
$b_i$	— inércia térmica da camada $i$ da parede envolvente
$b_j$	— inércia térmica da camada $j$ da parede envolvente
$b_1$	— inércia térmica da camada 1 da parede envolvente
$b_2$	— inércia térmica da camada 2 da parede envolvente
$c$	— calor específico da envolvente do compartimento [J/kgK]
$c_a$	— calor específico do aço [J/kgK]
$c_p$	— calor específico do material de proteção contra incêndio independente da temperatura
$d_p$	— espessura do material de proteção contra incêndio [m]
$f_y$	— tensão de cedência efetiva do aço à temperatura ambiente
$f_{y,\theta}$	— tensão de cedência efetiva do aço à temperatura elevada, $\theta$
$h_{eq}$	— média pesada da altura das aberturas verticais em todas as paredes [m]
$\dot{h}_{net,d}$	— valor de cálculo do fluxo de calor efetivo por unidade de área [W/m <sup>2</sup> ]
$k_{E,\theta}$	— fator de redução para a reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço $\theta_a$ atingida no instante $t$
$k_{LT}$	— fator de interação
$k_{sh}$	— fator de correção para ter em conta o efeito de sombra
$k_y$	— fator de interação
$k_{y,\theta}$	— fator de redução da tensão de cedência efetiva à temperatura $\theta$ atingida no instante $t$
$k_z$	— fator de interação
$m$	— fator de combustão
$q_{f,d}$	— valor de cálculo da densidade da carga de incêndio por unidade de área do pavimento
$q_{f,k}$	— valor característico da densidade da carga de incêndio por unidade de área do pavimento
$q_{t,d}$	— valor de cálculo da densidade da carga de incêndio por unidade de área da superfície envolvente
$s_i$	— espessura da camada $i$ [m]
$s_{lim}$	— espessura limite [m]
$s_1$	— espessura da camada 1
$s_2$	— espessura da camada 2
$t$	— tempo [h]
$t_{fi,d}$	— valor de cálculo da resistência ao fogo (propriedade do elemento ou da estrutura)
$t_{fi,requ}$	— tempo requerido de resistência ao fogo
$t_{max}$	— tempo correspondente à temperatura máxima no compartimento de incêndio
$t_{lim}$	— tempo correspondente à temperatura máxima no compartimento de incêndio no caso do incêndio ser controlado pela carga de incêndio

$t^*$  — tempo fictício [h]

### Letras maiúsculas latinas

$A$	— área da secção transversal
$A_d$	— valor de cálculo de uma ação de acidente
$A_f$	— área do pavimento [m <sup>2</sup> ]
$A_j$	— área da superfície envolvente $j$ , não incluindo as aberturas
$A_m$	— área da superfície do elemento por unidade de comprimento [m <sup>2</sup> /m]
$A_p/V$	— fator de massividade para os elementos não protegidos
$A_p$	— área apropriada do material de proteção contra incêndio por unidade de comprimento do elemento [m <sup>2</sup> /m]
$A_t$	— área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas) [m <sup>2</sup> ]
$A_v$	— área total das aberturas verticais em todas as paredes [m <sup>2</sup> ]
$E_a$	— módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente
$E_{a,\theta}$	— inclinação da reta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas $\theta_a$
$E_{fi,d}$	— valor de calculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, determinado de acordo com a EN 1991-1-2. Incluindo os efeitos das dilatações e das deformações térmica
$E_{fi,d,t}$	— valor de calculo dos efeitos relevantes das ações em situação de incêndio, no instante $t$
$G_{k,j}$	— valor característico da ação permanente $j$
$M_{fi,\theta,Rd}$	— valor de cálculo do momento resistente da secção transversal para uma temperatura uniforme $\theta_a$ igual à temperatura uniforme $\theta_a$ no instante $t$ numa secção transversal que não é termicamente influenciada pelos apoios
$M_{y,fi,Ed}$	— valor do momento fletor, segundo $y$ , atuante na situação de incêndio
$M_{Rd}$	— valor de cálculo do momento plástico resistente da secção transversal bruta $M_{pl,Rd}$ à temperatura normal; valor de cálculo do momento elástico resistente da secção transversal bruta $M_{el,Rd}$ à temperatura normal
$M_{z,fi,Ed}$	— valor do momento fletor, segundo $z$ , atuante na situação de incêndio
$N_{fi,Ed}$	— valor do esforço de compressão, atuante na situação de incêndio
$O$	— fator de abertura do compartimento de incêndio
$O_{lim}$	— fator de abertura reduzido em caso de incêndio controlado pela carga de incêndio
$P$	— valor representativo de uma ação de pré-esforço
$Q_{k,1}$	— valor característico da ação variável de base da combinação 1
$Q_{k,i}$	— valor característico da ação variável acompanhante $i$
$R_{fi,d,0}$	— valor de calculo da resistência do elemento em situação de incêndio, no instante $t=0$
$R_{fi,d,t}$	— valor de calculo da resistência do elemento em situação de incêndio, no instante $t$

---

- $V$  — volume do elemento por unidade de comprimento [ $\text{m}^3/\text{m}$ ]  
 $W_{pl}$  — módulo de flexão plástica de uma secção transversal

### Letras minúsculas gregas

- $\alpha$  — coeficiente de transmissão de calor por convecção  
 $\beta_M$  — coeficiente de momento uniforme equivalente  
 $\gamma_{M,fi}$  — coeficiente parcial para a propriedade considerada do material, em situação de incêndio  
 $\gamma_{M,0}$  — coeficiente parcial de segurança  
 $\gamma_{M,fi}$  — coeficiente parcial para a propriedade considerada do material, em situação de incêndio  
 $\delta_{q1}$  — fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento  
 $\delta_{q2}$  — fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação  
 $\delta_n$  — fator parcial que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio  $i$  (sprinklers, deteção, alarme, bombeiros...)  
 $\theta_{a,cr}$  — temperatura crítica do aço  
 $\theta_{a,t}$  — temperatura do aço no instante  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\theta_{cr,d}$  — valor de cálculo da temperatura crítica do elemento  
 $\theta_d$  — valor de cálculo da temperatura do elemento  
 $\theta_g$  — temperatura do compartimento de incêndio [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\theta_{g,t}$  — temperatura ambiente dos gases no instante  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\lambda$  — condutividade térmica da envolvente do compartimento [ $\text{W}/\text{mK}$ ]  
 $\lambda_p$  — condutividade térmica do sistema de proteção contra incêndio [ $\text{W}/\text{mK}$ ]  
 $\lambda$  — esbelteza normalizada  
 $\bar{\lambda}_{\theta}$  — esbelteza normalizada para a temperatura  $\theta_a$   
 $\mu_0$  — grau de utilização no instante  $t=0$   
 $\rho$  — massa específica da envolvente do compartimento [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\rho_a$  — massa específica do aço [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\rho_p$  — massa específica do material de proteção contra incêndio [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\chi_{fi}$  — coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio  
 $\chi_{LT,fi}$  — coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio  
 $\chi_{min,fi}$  — valor mínimo de  $\chi_{y,fi}$  e  $\chi_{z,fi}$   
 $\chi_{y,fi}$  — coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em torno do eixo  $y$ , em situação de incêndio  
 $\chi_{z,fi}$  — coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em torno do eixo  $z$ , em situação de incêndio  
 $\psi_2$  — coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

### Letras maiúsculas gregas

- $\Gamma$  – fator de tempo, função do fator de abertura  $O$  e da inércia térmica  $b$
- $\Gamma_{lim}$  – fator de tempo, função do fator de abertura  $O_{lim}$  e da inércia térmica  $b$
- $\Delta t$  – intervalo de tempo [s]
- $\Delta\theta_{a,t}$  – variação da temperatura de um perfil metálico durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  [K]
- $\Delta\theta_{g,t}$  – variação da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  [K]

## **Abreviaturas**

Pp – peso próprio

RHS – Secção tubular retangular (rectangular hollow section)

SHS – Secção tubular quadrada (square hollow section)

# 1 Introdução

## 1.1 Construção metálica

As estruturas metálicas apresentaram-se, desde sempre, como uma excelente alternativa à hegemonia que o betão armado detém na construção civil. A necessidade de criar estruturas mais leves, com menor peso da mão-de-obra no custo final e com menor impacto ambiental fizeram com que o aço passasse a ser mais utilizado. Assistiu-se, então, a um aumento da competitividade deste tipo de solução estrutural em diversas áreas da construção, nomeadamente em pontes, pavilhões industriais e desportivos, coberturas de estádios, edifícios de escritórios e parques de estacionamento, entre outras (Simões, 2014).

O ferro começou a ser usado no século XII como tirantes e pendurais em ferro fundido para o uso como elementos secundários em estruturas de madeira, já nos dias que correm os perfis são constituídos por aço e não apenas ferro, pois este tem comportamento demasiado dúctil.

No final do século XVIII começaram a surgir as primeiras estruturas de ferro fundido em cúpulas de igrejas e ainda em pontes, a primeira destas pontes foi erguida recorrendo a uma construção em arco, sendo datada de 1779 situada em *Coalbrookdale*, sobre o Rio Sevem na Inglaterra (CEAM-UFMG@, 2014).



Figura 1.1 Ponte *Coalbrookdale* (CEAM-UFMG@, 2014).

Na história mais recente da construção metálica podemos encontrar edifícios como as *Volkswagen Towers* na Alemanha ou o *Empire State Building* em *Nova York*, sendo estes dois grandes ícones de avanço tecnológico e inovação na construção metálica.

Em Portugal temos também grandes exemplos de importantes obras desafiadoras e imponentes para a construção metálica como são a Ponte 25 de Abril em Lisboa, a Ponte D. Luís no Porto e ainda a ponte Pedro e Inês em Coimbra.



Figura 1.2 Ponte Pedro e Inês em Coimbra (Wikipédia@, 2015).

## 1.2 Perfis tubulares

As vantagens da construção metálica, recorrendo a perfis tubulares é reconhecida por todos. De entre as suas características resistentes destacam-se:

- i) elevada resistência a esforços axiais de tração e compressão,
- ii) superior resistência a encurvadura lateral quando sujeito a esforços de compressão,
- iii) igual distribuição do aço ao longo da secção transversal sendo igualmente resistente a momentos flectores aplicados em ambas as direções,
- iv) resistência a momento torsor devido a elevada resistência obtida com o pouco material necessário quando comparado com outras soluções.

Do ponto de vista estético estes são também muito vantajosos conferindo às estruturas uma arquitetura moderna e arrojada com as suas linhas uniformes e regulares, tendo ainda uma grande vantagem na sua fácil manutenção e pintura (FERPINTA@, 2014).

Apesar de todas as vantagens apresentadas pelos perfis tubulares face aos perfis de secção aberta, a sua aceitação como principal elemento na construção metálicas tem sofrido alguma inércia devido a dificuldade encontrada na execução de ligações entre perfis deste tipo.

### 1.3 Enquadramento (projeto FRAMEUP)

A presente tese surge no âmbito do projeto FRAMEUP, que foi financiado pelo Fundo de Investimento Europeu de Carvão e Aço, tendo sido executado por 7 distintas entidades credenciadas, das quais o Departamento de Engenharia da Civil da Universidade de Coimbra faz parte. As diversas entidades estiveram a trabalhar no estudo do projeto realizando modelações numéricas, procedimentos analíticos e ensaios experimentais.

Este projeto pretende analisar e estudar um novo método de construção de estruturas metálicas; esta nova técnica assenta no princípio de iniciar a construção do edifício pelo último andar, embora montado ao nível do solo, sendo este elevado com recurso a macacos hidráulicos, para que sejam adicionados à estrutura os andares inferiores (Figura 1.3).

Para este tipo de construção ser viável e rápida de executar, os vários compartimentos são constituídos por módulos pré-fabricados que chegam a obra prontos a ser adicionados a estrutura. Esta é constituída por perfis metálicos de secção quadrada oca para os pilares e perfis metálicos de secção retangular oca para as vigas.

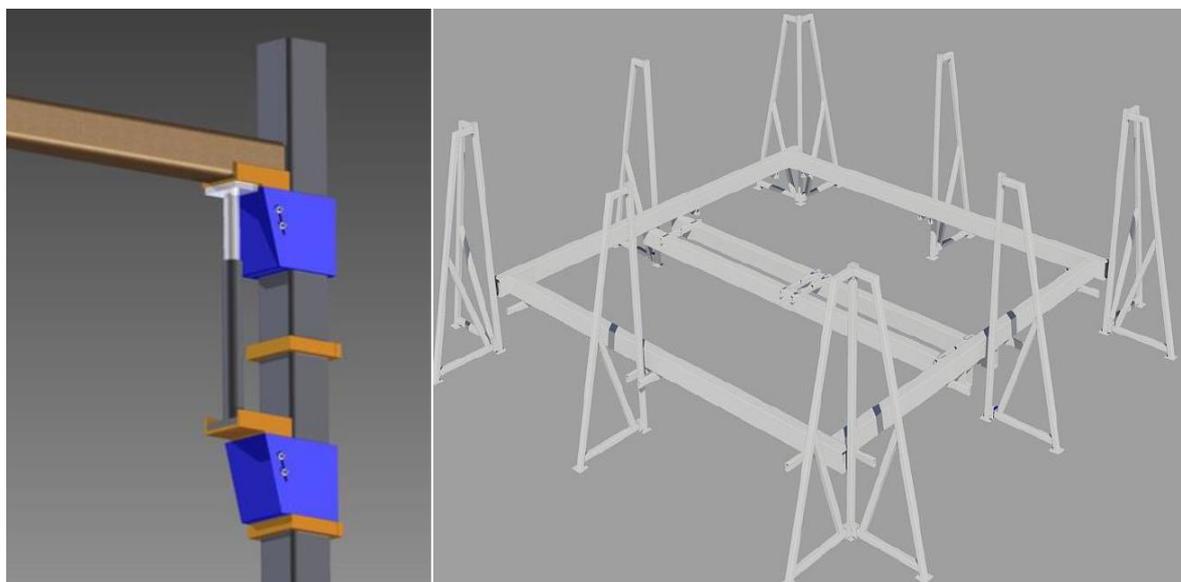


Figura 1.3 Macaco hidráulico e esquema de vigas principais nos andares (FRAMEUP, 2013)

Na Figura 1.4 pode ser observado o esquema de construção dos andares, pode ver-se os módulos do último andar já assentes nas vigas principais, estando este último andar já elevado do solo e pronto a que seja montado o andar inferior, sendo este processo é repetido até a estrutura ficar completa (Figura 1.5).



Figura 1.4 Último andar após primeira elevação (FRAMEUP, 2013)

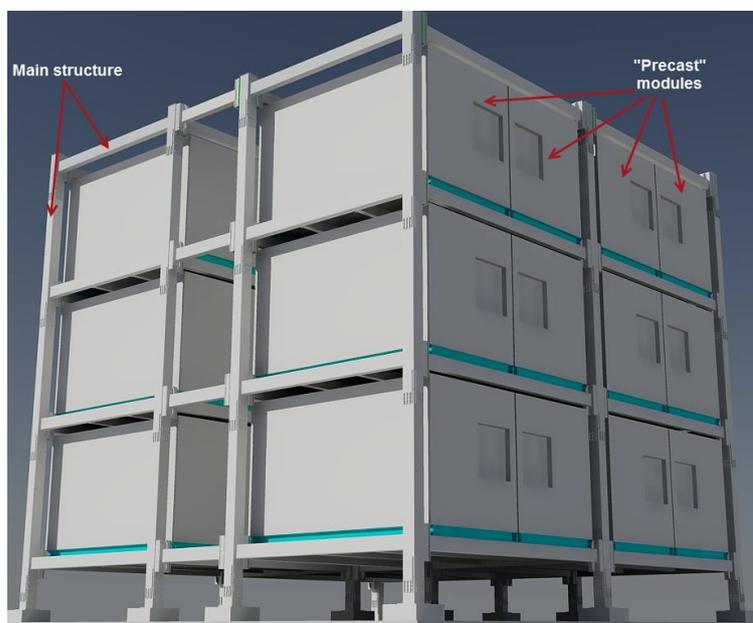


Figura 1.5 Estrutura com três andares (FRAMEUP, 2013)

No caso de estudo do projeto FRAMEUP, os vários andares são constituídos por oito módulos todos eles destinados a uma utilização residencial, sendo alguns dos módulos as cozinhas e salas comuns e os restantes destinados a quartos. Os módulos estão dispostos em grupos de quatro com um corredor no meio dos dois alinhamentos. Na Figura 1.6 pode ser observada a distribuição dos módulos assim como uma representação tipo dos vários andares.

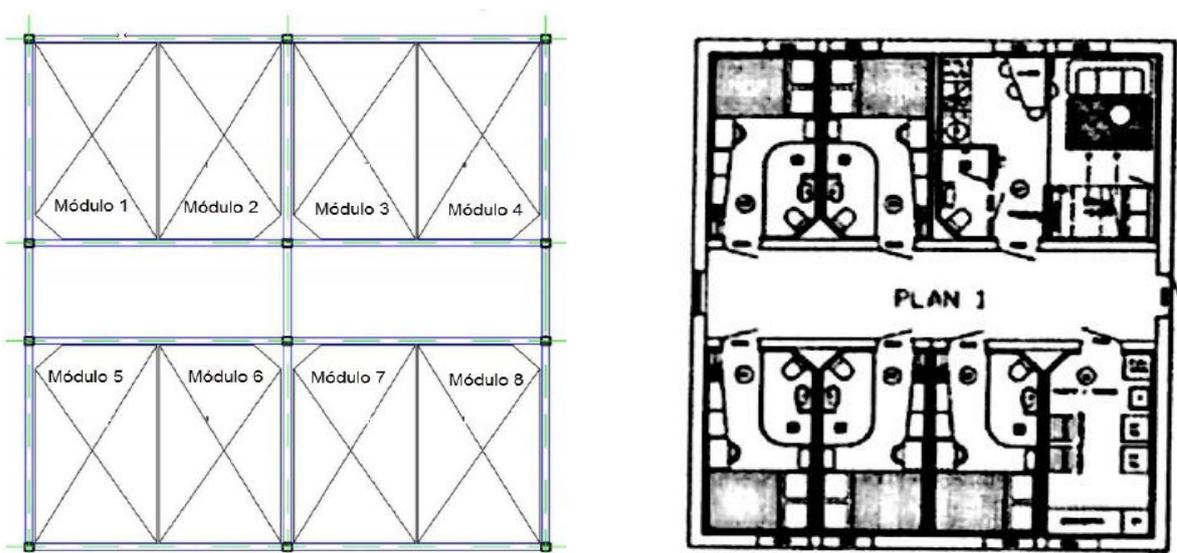


Figura 1.6 Planta dos vários andares da estrutura e planta ilustrativa dos interiores (FRAMEUP, 2013) (Monteiro, 2013)

A estrutura principal é constituída por seis andares tendo os pilares dos primeiros cinco uma altura de 3,01 m e o último andar 3,34 m, sendo as dimensões em plantas 12,77x11,10 m. Os módulos descarregam nas vigas principais de duas formas distintas, sendo no menor lado de cada módulo a carga aplicada de forma linear ao longo da viga principal, já o lado de maior dimensão descarrega por duas vigas secundárias. Os elementos da estrutura principal são SHS 250x250x10 para pilares e RHS 250x150x8 para vigas.

Nota : na Figura 1.7 os elementos VKRK correspondem aos perfis SHS (square hollow section) e os VKRR dizem respeito aos perfis RHS (rectangular hollow section).

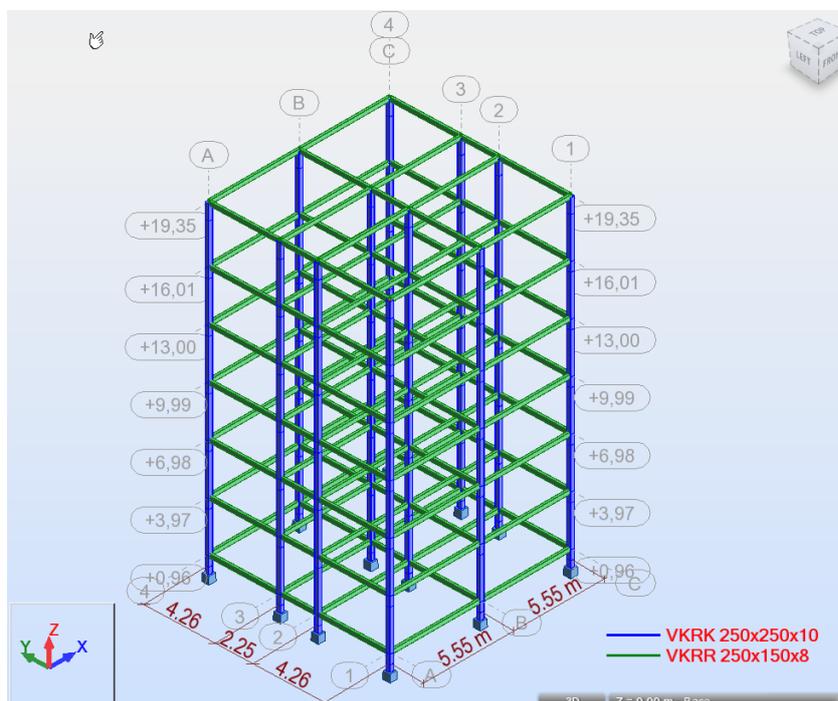


Figura 1.7 Geometria e secções da estrutura completa (FRAMEUP, 2013)

#### 1.4 Objetivo

Esta tese estuda o comportamento global de toda a estrutura principal do edifício FRAMEUP quando sujeita a dois cenários de incêndio. Os cenários foram decididos tendo em conta as localizações mais gravosas em termos de carregamentos: módulo 1 e módulo 2 do andar inferior (Figura 1.6).

A análise irá consistir em duas verificações:

- Análise térmica: Avaliação das temperaturas na estrutura devido aos cenários de incêndio estudados
- Análise mecânica: Quantificação dos esforços para os estados limite de acidente
- Verificação da estrutura em situação de incêndio: - domínio da resistência; domínio da temperatura

### **1.5 Software**

Para a análise da estrutura do edifício FRAMEUP quando sujeito a uma situação de incêndio localizado no interior de um módulo foram utilizados três programas de cálculo distintos, o OZone, o Elefir EN e o Abaqus.

O OZone é um programa que determina a temperatura no ar dentro de um compartimento sujeito a um incêndio recorrendo as formulações do Eurocódigo 1, parte 1-2 (CEN, 2010a), permitindo também determinar a temperatura no perfil metálico e proceder a verificação da resistência ao fogo, segundo o Eurocódigo 3, parte 1-2 (CEN 2010b).

O Elefir EN é muito semelhante ao OZone pois também este permite o cálculo da temperatura no ar dentro do compartimento de incêndio, assim como o cálculo da temperatura no perfil metálico em função do tempo e ainda a verificação da segurança dos elementos.

Sendo ambos os programas muito semelhantes a decisão de usar ambos para tarefas distintas foi tomada com base nas simplificações que impediam a análise completa recorrendo apenas a um dos dois. O OZone foi utilizado para o cálculo da curva paramétrica da temperatura no ar dentro do compartimento de incêndio pois permitia uma maior pormenorização de toda a área de incêndio assim como o a pormenorização dos elementos que constituem as paredes, teto e pavimento. Não foi usado para o cálculo da temperatura nos elementos estruturais porque apenas permite secções transversais abertas de paredes finas, sendo, sendo a estrutura composta por elementos tubulares.

Para o cálculo da temperatura nos elementos metálicos foi assim utilizado o Elefir EN (que já possui na sua base de dados as secções utilizadas no projeto), importando a curva de temperatura no ar calculada pelo OZone. O cálculo para a verificação das secções em situação de incêndio foi também este feito com recurso ao Elefir EN.

O Abaqus é um programa numérico de elementos finitos que permite um grande leque de análises e cálculo avançado, para diferentes tipos de materiais e diversos tipos de comportamento reológico, este foi utilizado na análise da estrutura quando submetida à ação térmica do incêndio, retirando a evolução ao longo do tempo dos diagramas de esforços, deslocamento, reacções de apoio entre outros.

## **1.6 Estruturação da tese**

Esta tese está dividida em cinco capítulos, estando cada um deles dividido em vários subcapítulos. A divisão foi definida em conformidade com o tema e fase do estudo em que foi desenvolvido; assim, fica representada a ordem cronológica pela qual o estudo do projeto teve lugar.

O primeiro capítulo é referente à introdução, onde foi feita uma recolha de elementos históricos do uso de aço em estruturas, assim como as principais vantagens dos perfis tubulares uma vez que estes são os utilizados na estrutura estudada, foi também referenciado o projeto do qual este estudo faz parte, assim como as ferramentas de cálculo utilizadas para desenvolver as análises.

O segundo capítulo inicia com a caracterização da evolução da temperatura em função do tempo dentro do compartimento de incêndio utilizando o OZone; já na segunda metade deste capítulo é calculada a temperatura ao longo do tempo nos perfis metálicos com recurso ao Elefir EN.

O terceiro capítulo descreve o processo de modelação da estrutura, a introdução dos dados materiais, a introdução dos carregamentos (mecânico e térmico) e apresenta os resultados (diagramas de esforços e deslocamentos ao longo do tempo).

No quarto capítulo é feita a verificação dos elementos sujeitos ao aquecimento provocado pelo incêndio assim como o cálculo da temperatura crítica para cada elemento.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões da análise desenvolvida para a estrutura FRAMEUP, assim como algumas possíveis sugestões de estudos futuros no âmbito da resistência ao fogo da estrutura.

## 2 Análise térmica

### 2.1 Introdução

Para que seja possível existir um incêndio é preciso a existência de três fatores em ao mesmo tempo: uma fonte de calor, um combustível e o comburente (oxigênio). Quando a temperatura da mistura entre combustível e comburente é suficientemente elevada ocorre a combustão. A curva de incêndio natural típica esta representada na Figura 2.1, ela é constituída por quatro fases: a, b, c e d.

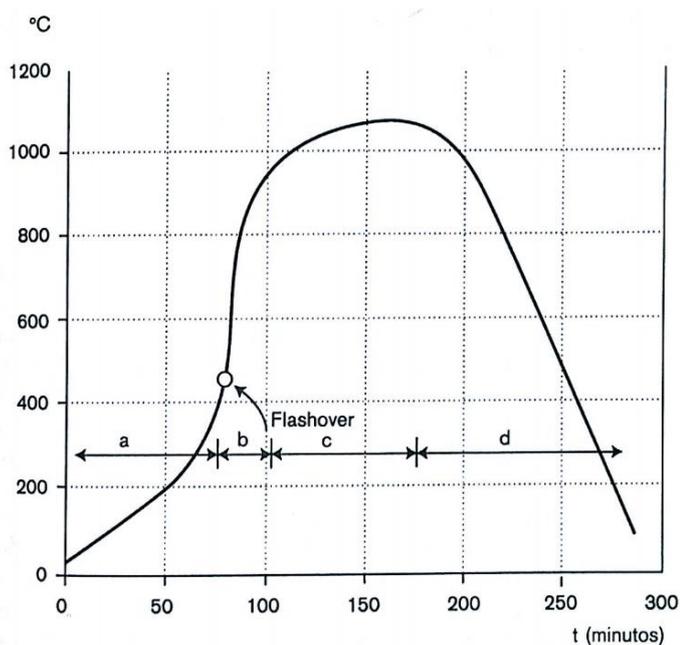


Figura 2.1 Curva de incêndio natural típica (Vila Real, 2003)

- a- Fase inicial ou de ignição: durante esta fase as temperaturas no ar do compartimento permanecem baixas, não tendo influência no comportamento estrutural dos edifícios; no entanto, esta é a fase mais crítica para a prevenção de perdas humanas devido à produção dos gases tóxicos

- b- Fase de propagação: o fogo espalhasse a todo o compartimento por radiação ou contacto direto, ocorrendo a um certo instante o fenómeno “*flashover*” quando subitamente se dá inflamação súbita dos gases, a partir do qual as temperaturas sobem rapidamente.
- c- Fase de desenvolvimento pleno: nesta fase ocorre a queima do material combustível não havendo grandes alterações da temperatura.
- d- Fase final ou arrefecimento: diminuição constante das temperaturas devido a falta de combustível ou comburente ou mesmo devido a intervenção de meios para a extinção do incêndio.

A fase de desenvolvimento pleno sofre uma grande influência da quantidade de oxigénio existente no compartimento, podendo esta dependência dar origem a duas situações distintas.

Na primeira, onde existe oxigénio suficiente, a taxa de combustão depende das características e quantidade do combustível existente, sendo o incêndio controlado pela carga de incêndio.

Já na segunda, a taxa de combustão está limitada pela quantidade de oxigénio existente no compartimento, estando esta dependente da tipologia e da quantidade de aberturas existentes; nesta situação o incêndio é controlado pela ventilação.

A representação dos incêndios reais nos edifícios por modelos adequados à verificação da segurança das estruturas em relação ao fogo, é particularmente difícil em face da grande variedade das situações que se podem apresentar e da multiplicidade de parâmetros influentes nos fenómenos em jogo. Tais modelos, para serem utilizáveis nas aplicações correntes, terão que ser necessariamente simplificados, mas sem deixar de representar de forma adequada a influência dos parâmetros que condicionam predominantemente o comportamento das estruturas (LNEC, 1990).

Os regulamentos apresentam várias maneiras de modelar a temperatura dos gases no compartimento de incêndio  $\theta_g$ . A parte 1.2 do Eurocódigo 1 (CEN, 2010a), por exemplo, estabelece que esta pode ser dada em termos de curvas nominais tempo-temperatura ou sob a forma de curvas paramétricas (Vila Real, 2003).

## 2.2 Temperatura de incêndio no módulo

A temperatura durante o incêndio no compartimento foi determinada recorrendo ao programa Ozone que permite obter a curva paramétrica de temperatura no interior de um compartimento.

### 2.2.1 Curva paramétrica

A curva de temperatura paramétrica está definida pelo Eurocódigo 1 parte 1.2 sendo a metodologia utilizada válida para compartimentos com uma área máxima de 500 m<sup>2</sup> em planta, uma altura máxima de 4 m, sem aberturas na cobertura e considerando que toda a carga de incêndio é totalmente consumida.

A curva paramétrica é definida por duas fases, uma primeira de aquecimento e a segunda de arrefecimento. Cada fase é dada por uma expressão analítica; a fase da curva de aquecimento é definida pela seguinte expressão (CEN 2010a):

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (1)$$

Onde:

$\theta_g$  temperatura no compartimento de incêndio [°C]

$$t^* = t \times \Gamma, \text{ tempo fictício [h]} \quad (2)$$

$t$  tempo em [h]

$$\Gamma = \left[ \frac{O}{b} \right]^2 / \left( \frac{0,04}{1160} \right)^2 \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}, \text{ fator } b \text{ em } J/m^2s^{1/2}K \text{ estando } 100 \leq b \leq 2200 \quad (4)$$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t, \text{ fator de abertura em } m^{1/2} \text{ estando } 0,02 \leq O \leq 0,20 \quad (5)$$

Com:

$\rho$  – massa específica da envolvente do compartimento [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  calor específico do compartimento [J/kgK]

$\lambda$  condutividade térmica da envolvente do compartimento [W/mK]

Sendo:

$A_v$  área total das aberturas verticais em todas as paredes [m<sup>2</sup>]

$h_{eq}$  média pesada da altura das aberturas verticais em todas as paredes [m]

$A_t$  área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas) [m<sup>2</sup>]

Para ter em conta o facto de as paredes serem compostas por várias camadas de diferentes materiais o fator  $b$  é calculado pelas seguintes formulações:

- se  $b_1 < b_2$ ,  $b = b_1$

- se  $b_1 > b_2$ , deve ser calculada uma espessura limite  $s_{lim}$  para o material exposto ao fogo

$$s_{lim} = \sqrt{\frac{3600 t_{max} \lambda_1}{c_1 \rho_1}}, \text{ sendo } t_{max} \text{ obtido da equação (1) onde se calcula } \theta_g \quad (6)$$

- se  $s_1 > s_{lim}$ ,  $b = b_1$

- se  $s_1 < s_{lim}$ ,  $b = \frac{s_1}{s_{lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{lim}}\right) b_2$

Para ser levado em conta a existência de materiais diferentes nas paredes, pavimento e teto a equação  $b = \sqrt{\rho c \lambda}$  deve ser calculada a partir de:

$$b = \left( \sum b_j A_j \right) / (A_t - A_v) \quad (7)$$

A temperatura máxima  $\theta_{max}$  durante a fase de aquecimento é atingida quando  $t^* = t_{max}^*$

$$t_{max}^* = t_{max} \cdot \Gamma \quad (8)$$

$$t_{max} = \max\left[(0,2 \times 10^{-3} \cdot q_{t,d}/0); t_{lim}\right] \quad (9)$$

Sendo:

$q_{t,d}$  valor de cálculo da densidade de carga de incêndio referida à área  $A_t$  da superfície envolvente [MJ/m<sup>2</sup>]

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} \quad (10)$$

Estando  $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$  [MJ/m<sup>2</sup>]

Onde:

$A_f$  área do pavimento [ $m^2$ ]

$q_{f,d}$  valor de cálculo da densidade da carga de incêndio referente a superfície  $A_f$  [ $MJ/m^2$ ]

As medidas de segurança são impostas geralmente para salvaguardar as vidas dos ocupantes.

A determinação do valor de  $t_{lim}$  é feita recorrendo à Tabela 2.1 e à Tabela 2.2 (Vila Real, 2003)

Tabela 2.1 Definição de  $t_{lim}$

Velocidade de propagação do incêndio	$t_{lim}$ [minutos]
Lenta	25
Média	20
Rápida	15

Tabela 2.2 Definição do tipo de ocupação

Ocupação	Velocidade de propagação do incêndio
Habitação	Média
Hospital	Média
Hotel (quarto)	Média
Biblioteca	Rápida
Escritório	Média
Sala de aulas em escola	Média
Centro Comercial	Rápida
Teatro (cinema)	Rápida
Transportes (espaço público)	Lenta

Se  $t_{max} = t_{lim}$ ,

$$t^* = t \times \Gamma_{lim} \quad (11)$$

$$\Gamma_{lim} = \left( \frac{O_{lim}}{b} \right) / \left( \frac{0,04}{1160} \right)^2 \quad (12)$$

$$O_{lim} = 0,1 \times 10^{-3} \times \frac{q_{t,d}}{t_{lim}} \quad (13)$$

Se  $O > 0,04$  e  $q_{t,d} < 75$  e  $b < 1160$  o valor  $\Gamma_{lim}$  em (10) tem de ser multiplicado por  $k$ , dado por:

$$k = 1 + \left( \frac{0 - 0,04}{0,04} \right) \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left( \frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (14)$$

A segunda parte da curva paramétrica é referente à fase de arrefecimento sendo definida por:

$$\theta_g = \begin{cases} \theta_{max} - 625(t^* - t^* \times x) & \text{se } t_{max}^* \leq 0,5 \\ \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^* \times x)(t^* - t^* \times x) & \text{se } 0,5 < t_{max}^* < 0,2 \\ \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* \times x) & \text{se } t_{max}^* \geq 2 \end{cases} \quad (15)$$

$$t_{max}^* = (0,2 \times 10^{-3} \times q_{t,d} / O) \times \Gamma \quad (16)$$

Sendo  $x=1$  para  $t_{max} > t_{lim}$  ou  $x = t_{lim} \times \Gamma / t_{max}^*$  se  $t_{max} = t_{lim}$

## 2.2.2 Densidade de carga de incêndio

A densidade de carga de incêndio a ser usada depende de medições ou em casos especiais é definida por fatores de resistência ao fogo definidos por regulamentos nacionais.

O valor de cálculo pode ser determinado com recurso a duas metodologias diferentes, a primeira recorrendo a valores tabelados nos regulamentos nacionais em função do tipo de utilização dos espaços, ou de forma analítica recorrendo a um cálculo detalhado para cada compartimento a estudar.

O valor da densidade de carga de incêndio é dado por:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \times m \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_n \quad [MJ/m^2] \quad (17)$$

Em que :

$q_{f,k}$  valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento [MJ/m<sup>2</sup>]

$m$  fator de combustão

$\delta_{q1}$  fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (18)$$

$\delta_{ni}$  fator parcial que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio,  $i$  (sprinklers, deteção, alarme automático, bombeiros...)

### 2.2.3 Modelação OZone

A curva paramétrica de temperatura de incêndio do compartimento em análise foi determinada com recurso ao programa OZone, estando a modelação sujeita a limitações por parte do programa de cálculo, sendo estas devidamente justificadas ao longo deste subcapítulo.

O compartimento de estudo é composto por duas divisões distintas, uma reservada ao quarto e outra ao wc, tendo sido aqui considerado apenas a área do quarto como sendo o compartimento de incêndio. Esta escolha deveu-se ao facto de o programa não permitir divisões com um número de paredes superior a 4, sendo o compartimento real composto por 6, foi então utilizado um compartimento composto por apenas 4 paredes com uma área total igual à área destinada ao quarto.

As paredes que fazem a divisão entre o quarto e o wc são compostas por um conjunto de materiais diferentes das paredes do módulo; assim, 3 das 4 paredes foram modeladas com o conjunto de materiais usados na parede exterior do módulo e a outra parede composta pelos materiais que compõem as paredes divisórias interiores. Os materiais utilizados em todas as paredes, teto e chão, assim como todas as características dos materiais e dimensões dos módulos, foram os definidos na tese de Monteiro (2013). Foi tomada ainda uma simplificação no número de camadas que fazem parte das paredes exteriores do módulo uma vez que o programa apenas aceita a introdução de 4 camadas; sendo as paredes compostas por 5 camadas, uma vez que as paredes são compostas por duas camadas de gesso cartonado, foi considerado apenas uma camada com a espessura da soma das duas existentes. A Figura 2.2 mostra a área modelada onde foi considerado o incêndio.

As duas paredes assinaladas na Figura 2.2 com os retângulos a azul são as divisórias entre o quarto e o wc, sendo, elas correspondentes à parede 4 na Figura 2.3.

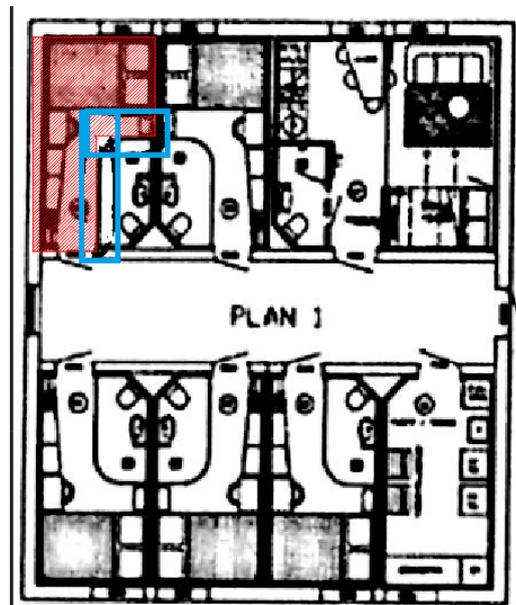


Figura 2.2 Área do quarto (Monteiro, 2013)

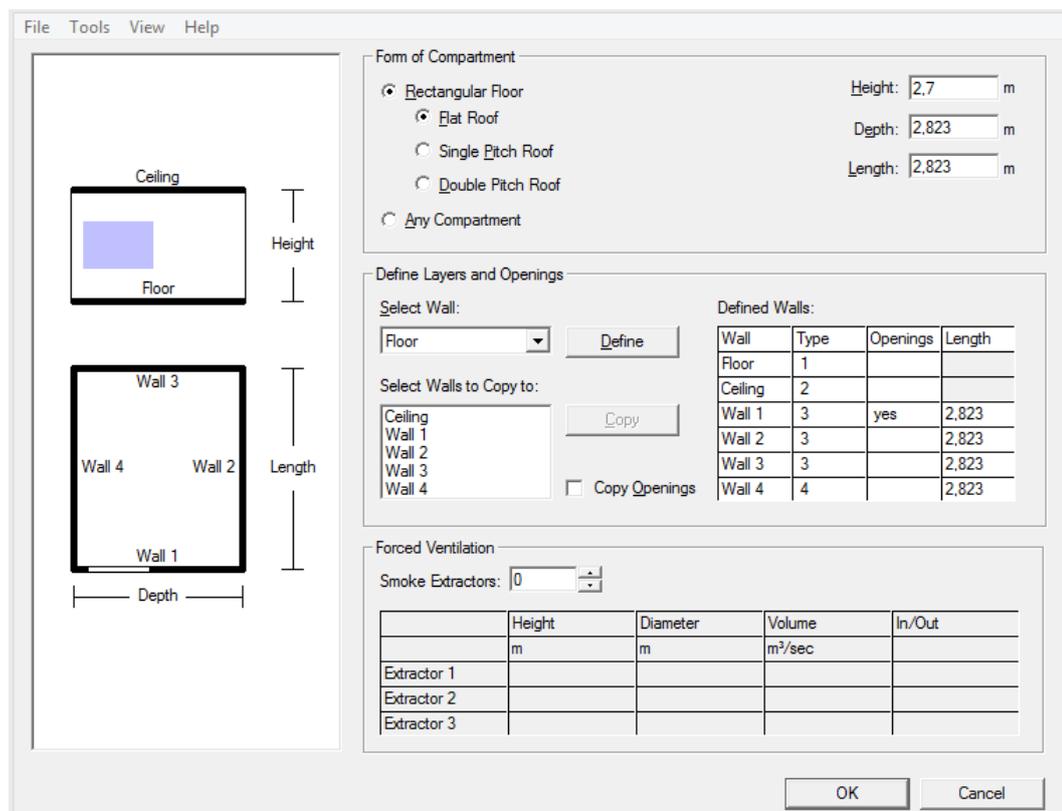


Figura 2.3 Representação das paredes do módulo e respectivas dimensões (OZone).

O módulo 2 tem uma tipologia igual ao módulo 1; assim as medidas utilizadas são as mesmas, não sendo necessário refazer o processo da Área do quarto para o segundo módulo.

Das Figura 2.4 à Figura 2.8 está representada a ordem das camadas de materiais, assim como os diferentes materiais das paredes, teto e pavimento do compartimento.

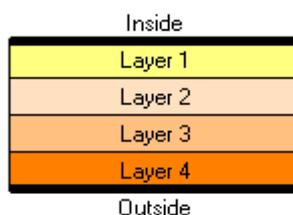


Figura 2.4 Representação e numeração das camadas nas paredes de dentro para fora (OZone)

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Normal weight Concrete [EN1994-1-2]	8	2100	1,4	1000	0,8	0,8
Layer 2	Steel [EN1994-1-2]	0,3	7850	60	600	0,8	0,8

Figura 2.5 Materiais do pavimento (OZone).

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Gypsum board [EN12524]	1,5	600	0,18	1000	0,8	0,8
Layer 2	Glass wool & Rock wool	3	60	0,04	1030	0,8	0,8
Layer 3	Steel [EN1994-1-2]	5	7850	60	600	0,8	0,8
Layer 4	Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	60	600	0,8	0,8

Figura 2.6 Materiais do teto (OZone).

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	Gypsum board [EN12524]	2,4	600	0,18	1000	0,8	0,8
Layer 2	Glass wool & Rock wool	5	30	0,04	1030	0,8	0,8
Layer 3	Steel [EN1994-1-2]	5	7850	60	600	0,8	0,8
Layer 4	Steel [EN1994-1-2]	0,1	7850	60	600	0,8	0,8

Figura 2.7 Materiais das paredes 1,2 e 3 do módulo (OZone).

	Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
	[m]	[m]	[m]		
Opening 1	1,1	2,2	1,1	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

Figura 2.8 Dimensões da abertura na parede 1 (OZone).

Com as envolventes do compartimento definidas, foi definido o tipo de ocupação do módulo como habitação, sendo o termo usado em inglês “*Dwelling*” (Figura 2.9).

Sendo as medidas ativas de combate ao incêndio desconhecidas, foi usada uma combinação que não diminui a carga de incêndio atuante. A temperatura dentro do compartimento foi calculada em intervalos de 5 em 5 segundos, com uma duração total de 240 minutos.

Pela Figura 2.10 é possível ver o valor máximo da temperatura no ar do compartimento (1145°C) durante o incêndio, assim como ao fim de quanto tempo foi alcançada essa temperatura, 49 minutos.

The screenshot shows the 'Fire Curve' dialog box in a software application. The 'Fire Curve' section is set to 'EN 1991 - 1 - 2'. Below this is a table with the following data:

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kW/m²]	Fire Load qf,k 80% Fractile [MJ/m²]	Danger of Fire Activation
Dwelling	Medium		250	948

The 'Active Fire Fighting Measures' section contains several checkboxes, all of which are checked and have a corresponding  $\delta_{n,i} = 1$  value:

- Automatic Water Extinguishing System  $\delta_{n,1} = 1$
- Independent Water Supplies (1 2)  $\delta_{n,2} = 1$
- Automatic Fire Detection by Heat  $\delta_{n,3} = 1$
- Automatic Fire Detection by Smoke  $\delta_{n,5} = 1$
- Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade  $\delta_{n,6} = 1$
- Work Fire Brigade  $\delta_{n,8} = 1$
- Off Site Fire Brigade  $\delta_{n,9} = 1$
- Safe Access Routes  $\delta_{n,10} = 1$
- Staircases Under Overpressure in Fire Alarm  $\delta_{n,9} = 1$
- Fire Fighting Devices  $\delta_{n,9} = 1$
- Smoke Exhaust System  $\delta_{n,10} = 1$

The 'Fire Info' section shows: Max Fire Area: 7,969329 m<sup>2</sup>; Fire Elevation: 0 m; Fuel Height: 0 m.

The 'Design Fire Load' section shows: Fire Risk Area: 7,969329 m<sup>2</sup>;  $\delta_{q,1} = 0,93$ ; Danger of Fire Activation:  $\delta_{q,2} = 1$ ; Active Measures:  $\prod \delta_{n,i} = 1$ ;  $q_{f,d} = \delta_{q,1} \delta_{q,2} \prod \delta_{n,i} \cdot q_{f,k} = 705,3$  MJ/m<sup>2</sup>.

The 'Combustion' section shows: Combustion Heat of Fuel: 17,5 MJ/kg; Combustion Efficiency Factor: 0,8; Combustion Model: Extended fire duration; Stoichiometric Coefficient: 1,27.

Figura 2.9 Tipo de ocupação do compartimento (OZone).

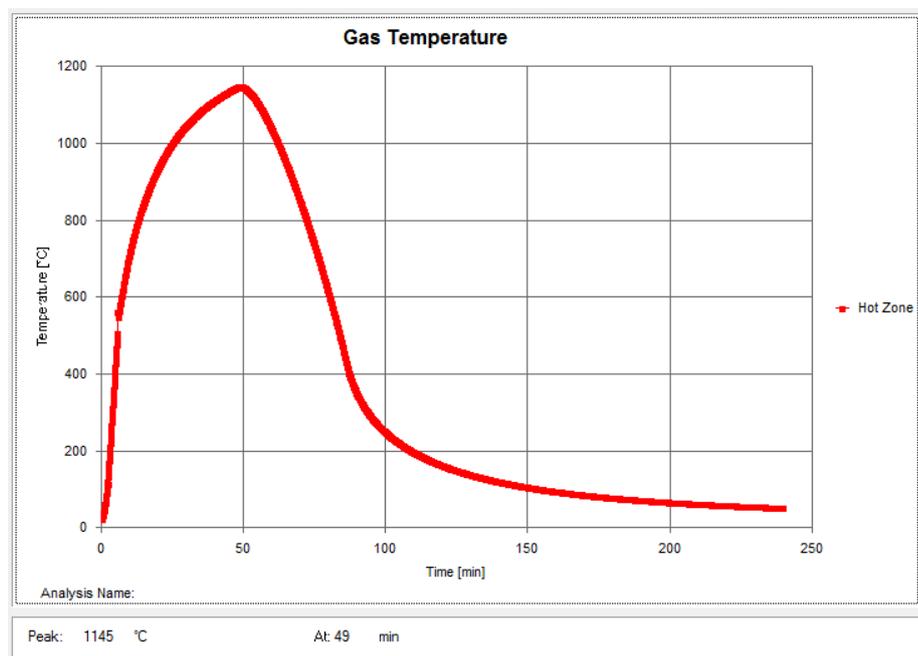


Figura 2.10 Curva paramétrica de temperatura dentro do compartimento (OZone).

## 2.3 Temperatura nos perfis metálicos da estrutura principal

### 2.3.1 Evolução da temperatura no aço

Segundo o Eurocódigo 1, Parte 1-2 o cálculo da temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  em elementos de aço, com secção transversal uniforme e uma distribuição uniforme da temperatura ao longo do elemento vem dado por (CEN, 2010a):

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m}{c_a \rho_a V} \dot{h}_{net,a} \Delta t \quad (19)$$

Onde:

$k_{sh}$  fator de correção para o efeito de sombra

$\frac{A_m}{V}$  fator de massividade para elementos de aço não protegidos [1/m]

$V$  volume do elemento por unidade de comprimento [m<sup>3</sup>/m]

$A_m$  área da superfície do elemento por unidade de comprimento [m<sup>2</sup>/m]

$c_a$  calor específico do aço [J/kgK]

$\dot{h}_{net,d}$  valor de cálculo do fluxo de calor efetivo por unidade de área [W/m<sup>2</sup>]

$\Delta t$  intervalo de tempo [s]

$\rho_a$  massa específica do aço [kg/m<sup>3</sup>]

Esta formulação é válida apenas para elementos de aço não protegidos, já para elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio a evolução da temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$  vem definida por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10-1}) \Delta\theta_{g,t} \quad (\text{mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0) \quad (20)$$

com:

$$\theta = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_a A_p/V \quad (21)$$

sendo:

$A_p/V$  fator de massividade para elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio

$A_p$  área apropriada do material de proteção contra incêndio por unidade de comprimento do elemento [m<sup>2</sup>/m]

$V$  volume do elemento por unidade de comprimento [m<sup>3</sup>/m]

$c_a$  calor específico do aço dependente da temperatura [J/kgK]

$c_p$  calor específico do material de proteção contra incêndio independentemente da temperatura [J/kgK]

$d_p$  espessura do material de proteção contra incêndio [m]

$\Delta t$  intervalo de tempo [s]

$\theta_{a,t}$  temperatura do aço no instante  $t$  [°C]

$\theta_{g,t}$  temperatura ambiente dos gases no instante  $t$  [°C]

$\Delta\theta_{g,t}$  aumento da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  [K]

$\lambda_p$  condutibilidade térmica do sistema de proteção contra incêndio [W/mK]

$\rho_a$  massa específica do aço [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  massa específica do material de proteção contra incêndio [kg/m<sup>3</sup>]

### 2.3.2 Modelação Elefir-EN

Pelo Elefir-EN foi calculada a curva de temperatura no aço em função da curva paramétrica de temperatura no compartimento. Este programa tem algumas limitações na particularização das situações de incêndio como aconteceu com o Ozone, tendo sido utilizadas algumas simplificações devidamente justificadas e sempre por forma a tornar a situação mais gravosa que a situação real, estando assim sempre do lado da segurança.

O cálculo da curva de temperatura foi feito para as vigas e para os pilares pois estes são perfis de secção diferente, com proteções diferentes e exposição ao fogo diferente.

#### 2.3.2.1 Temperatura nos pilares

Os pilares foram modelados em secção SHS 250x250x10, como estando expostos ao fogo nos 4 lados. A situação real (mais desfavorável) não é possível de modelar no programa: pilares expostos ao fogo em apenas dois lados, sendo que os outros estão voltados para o exterior do compartimento, como se observa pela Figura 2.11. A proteção considerada é constituída pelos painéis de gesso cartonado, existentes nas paredes do módulo, sendo a sua espessura de 24 mm (Figura 2.7).

Pela Figura 2.12 é possível ver que a temperatura máxima nos pilares é atingida ao fim de 87,68 min, sendo o seu valor de 518°C.

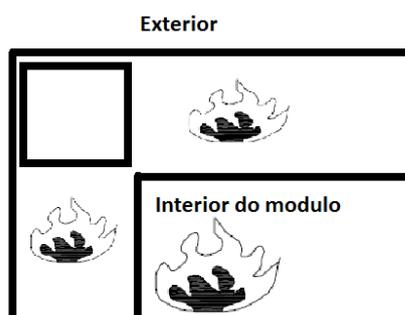


Figura 2.11 Representação do incêndio no pilar

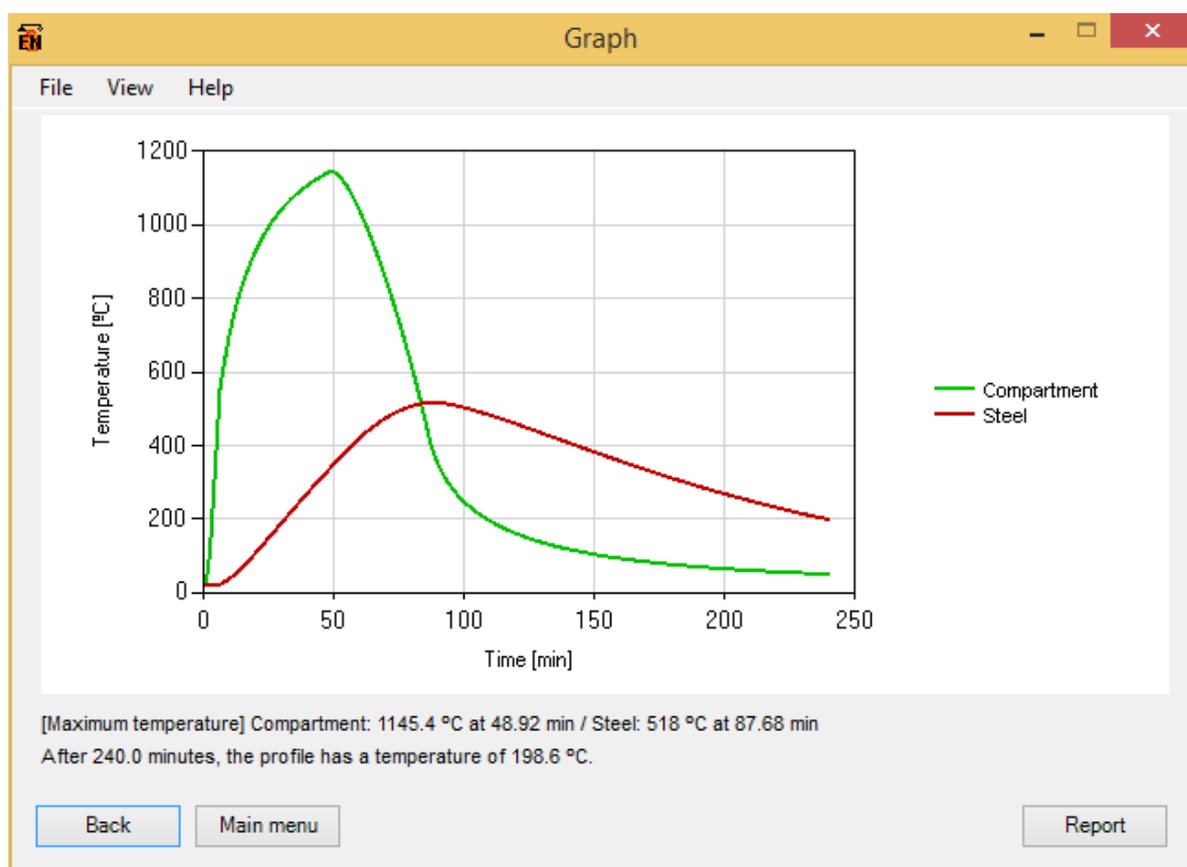


Figura 2.12 Curva de temperatura nos pilares e compartimento (Elefir EN).

### 2.3.2.2 Temperatura nas vigas

Para a modelação das vigas foi usada uma secção RHS 250x150x8, sendo que se trata de vigas em que o banzo superior está protegido do fogo pela laje de betão; tendo sido usado um modelo com exposição ao fogo em 3 lados, tendo ainda sido considerado que a viga esta protegida por um painel de gesso cartonado, com uma espessura de 15 mm, como está definido na Figura 2.6.

Da Figura 2.13 vem que a temperatura máxima nas vigas é de 665°C sendo esta atingida ao minuto 80.

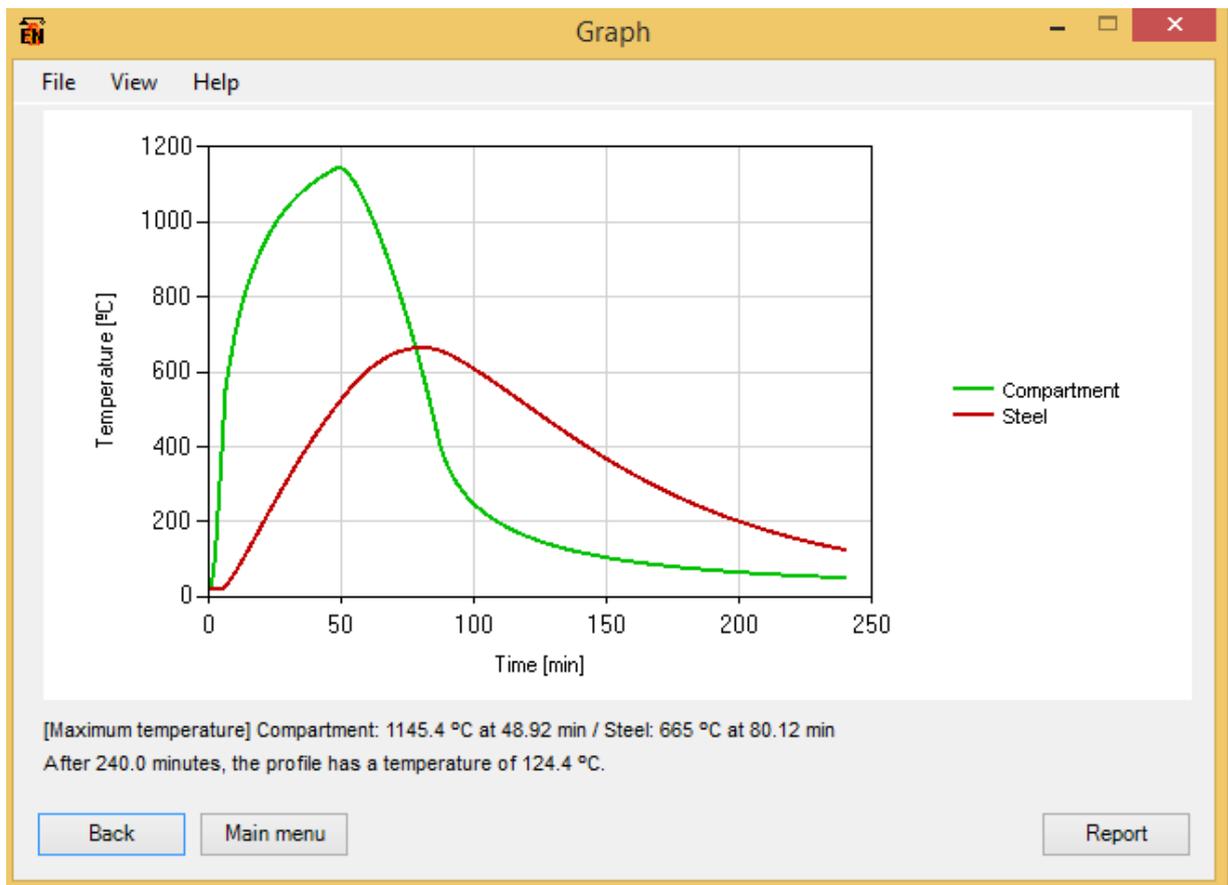


Figura 2.13 Curva de temperatura nas vigas e no compartimento (Elefir EN).

### 3 Análise mecânica

#### 3.1 Combinação de acidente

Na análise do comportamento de uma estrutura ao fogo é usada a combinação de acidente, estabelecida no Eurocódigo 0 (CEN, 2009).

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + A_d + \psi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (22)$$

Onde:

$G_{kj}$  valor característico da ação permanente  $j$

$P$  valor representativo de uma ação de pré-esforço

$A_d$  valor de cálculo de uma ação de acidente

$Q_{k,1}$  valor característico da ação variável de base da combinação 1

$Q_{k,i}$  valor característico da ação variável acompanhante  $i$

$\psi_2$  Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

Os valores dos coeficientes  $\psi_2$  estão apresentados na Tabela 3.1

Tabela 3.1 Coeficientes  $\psi_2$

Ação	$\psi_2$
Sobrecarga em edifícios	0,3
Categoria A: zonas de habitação	
Categoria H: Coberturas	0
Ação da Neve	0,2
Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	
Ação do Vento	0

Todas as ações aplicadas à estrutura foram obtidas da tese de Mendes (2014) para assim estar em conformidade com os carregamentos utilizados em anteriores estudos desenvolvidos no âmbito do projeto FRAMEUP. Estes carregamentos estão apresentados no anexo A.

A análise do modelo do edifício foi feita com recurso ao programa de cálculo numérico por elementos finitos Abaqus.

### 3.2 Modelação em Abaqus

A modelação da estrutura foi feita em Abaqus, este permite a modelação de elementos de tipo viga e de tipo casca, tendo sido para este estudo usados elementos do tipo viga para modelar os pilares e as vigas.

Sendo este um estudo em situação de incêndio é feita uma análise em regime elasto-plástico, sendo importante definir o módulo de *Young* ( $E$ ) em função da temperatura, assim, como a tensão de cedência. Sendo que estes sofrem uma redução do seu valor à medida que a temperatura nos elementos vai aumentando, conforme se descreve na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Fator de redução para  $E_a$  e  $f_y$  em função da temperatura (CEN 2010b)

Temperatura do aço $\theta_a$ (°C)	Fatores de Redução à temperatura $\theta_a$ relativamente ao valor de $f_y$ ou $E_a$ a 20°C	
	Fator de redução (referência a $f_y$ ) para tensão de cedência $k_{y,\theta}=f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução (referência a $E_y$ ) para o declive do domínio elástico do domínio $k_{E,\theta}=E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130
800	0,110	0,090
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

Foi ainda usado o coeficiente de dilatação térmico ( $\alpha$ ) de  $1,4 \times 10^{-5}$  para uma completa caracterização do material; este coeficiente foi considerado como inalterável com o aumento de temperatura.

A ligação entre as vigas e os pilares é semirrígida, pois algumas das componentes na ligação são muito deformáveis, a rigidez é 18145 [kNm/rad] tendo sido obtida da tese de Silva (2014)

Os pilares dos vários pisos foram ligados entre si como encastramentos perfeitos, assim como os apoios da estrutura.

Foram então aplicadas as cargas à estrutura e programada a combinação de acidente, que atua em duas fases; na primeira onde o carregamento atuante na estrutura é multiplicado pelos fatores de combinação correspondentes e na segunda é aplicada a carga térmica nas vigas e pilares pelo período de análise da atuação do incêndio.

### 3.3 Caso de estudo - fogo no módulo 1

No primeiro caso de estudo foi aplicada a variação de temperatura nas vigas e pilares adjacentes ao módulo 1 (Figura 3.1). Esta variação foi obtida do Elefir EN, e é definida na Figura 2.12 para os pilares e na Figura 2.13 nas vigas.

A variação de temperatura atuou ao longo de 240 minutos.

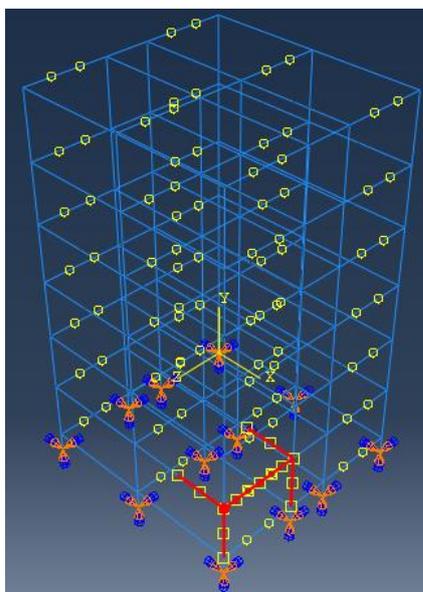


Figura 3.1 Vigas e pilares afetados pela variação de temperatura no módulo 1 (Abaqus).

### 3.4 Caso de estudo - fogo no módulo 2

Este segundo caso a ser estudado representa uma situação de incêndio a atuar no módulo 2, sendo feita de forma idêntica à tratada no subcapítulo 3.3 (Figura 3.2).

A situação de incêndio foi simulada com a curva de temperatura nos pilares das vigas resultantes do Elefir EN e representadas nas figuras Figura 2.12 e Figura 2.13 para os pilares e vigas respetivamente.

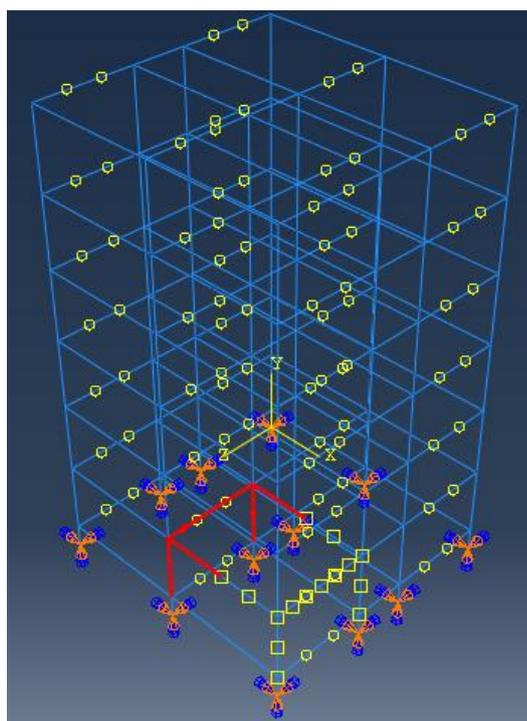


Figura 3.2 Vigas e pilares afetados pela variação de temperatura no módulo 2 (Abaqus).

### 3.5 Análise mecânica

O modelo estrutural foi analisado em várias fases do carregamento da estrutura, o primeiro ponto importante de analisar é o instante imediatamente antes de ser aplicada a carga térmica nas vigas e pilares a simular o incêndio, sendo esta primeira análise o ponto de partida onde foram obtidos os diagramas de esforços iniciais da estrutura para a combinação de acidente.

Importa referir que foi feito este estudo em duas situações diferentes, a primeira onde atuam as forças horizontais devidas às imperfeições geométricas na direção  $0^\circ$  e na segunda onde atuam às imperfeições geométricas segundo a direção  $90^\circ$ . Tendo-se chegado à conclusão que os

esforços internos devidos as imperfeições geométricas na direção  $0^\circ$  são maiores quando comparados com as imperfeições geométricas na direção  $90^\circ$ , assim todos os dados relativos aos modelos nesta tese apresentados são usados para a situação onde atuam as imperfeições geométricas na direção  $0^\circ$ . A direção  $0^\circ$  corresponde ao eixo Z do referencial global nas figuras apresentadas sendo a direção  $90^\circ$  referente ao eixo X do referencial global.

Na Figura 3.3 estão representados os eixos de referência local dos pilares e das vigas. Os esforços de SF1 referentes ao eixo axial dos elementos, os momentos de SM1 referidos ao eixo local X dos pilares e vigas e por sua vez SM2 referente ao eixo local Y.

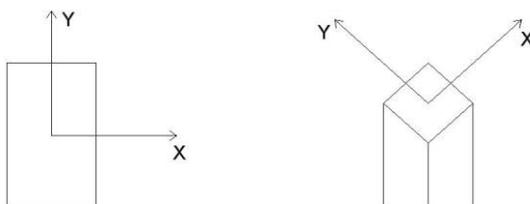


Figura 3.3 Eixos de referência local das vigas e pilares

Nas Figuras 3.4 até à Figura 3.6 estão representados os esforços da estrutura imediatamente antes de ser aplicada a carga de incêndio segundo o referencial local da Figura 3.3, já da Figura 3.7 até à Figura 3.9 estão representados os deslocamentos da estrutura segundo os eixos globais de referência.

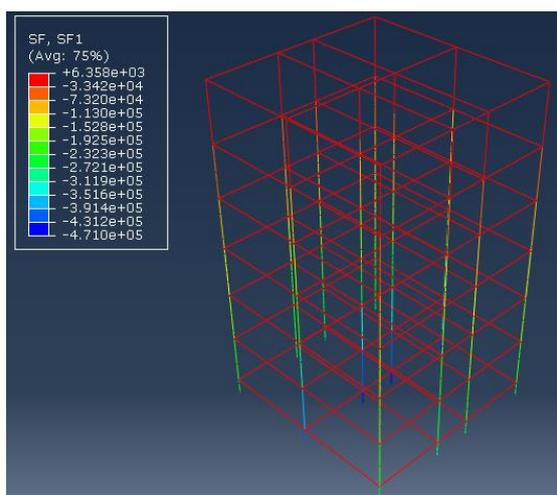


Figura 3.4 Esforço axial (Abacus)

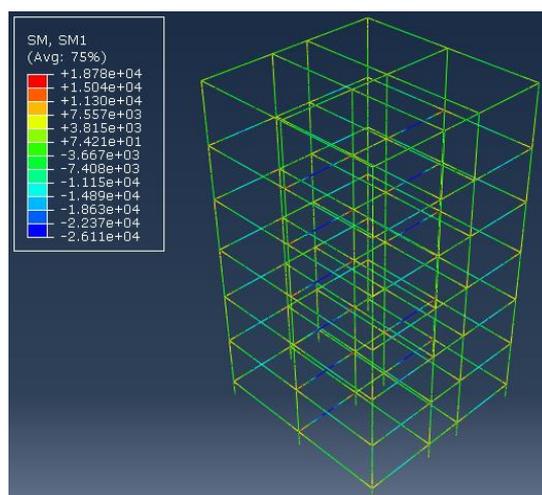


Figura 3.5 Momento fletor em torno X local (Abaqus)

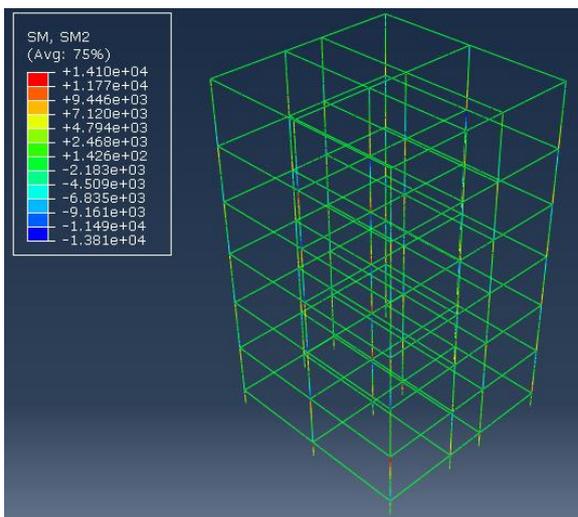


Figura 3.6 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus)

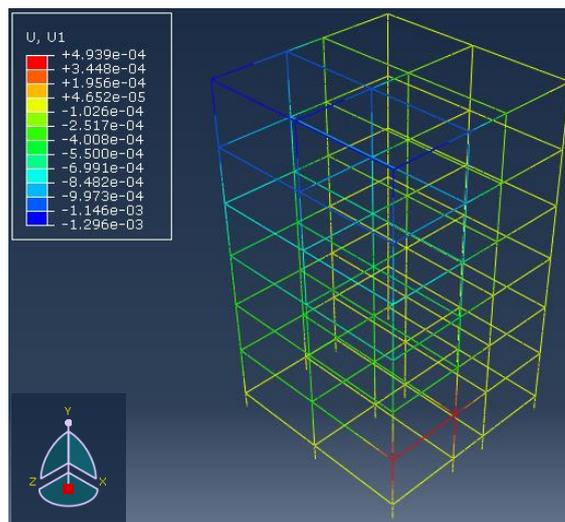


Figura 3.7 Deslocamento segundo x global (Abaqus)

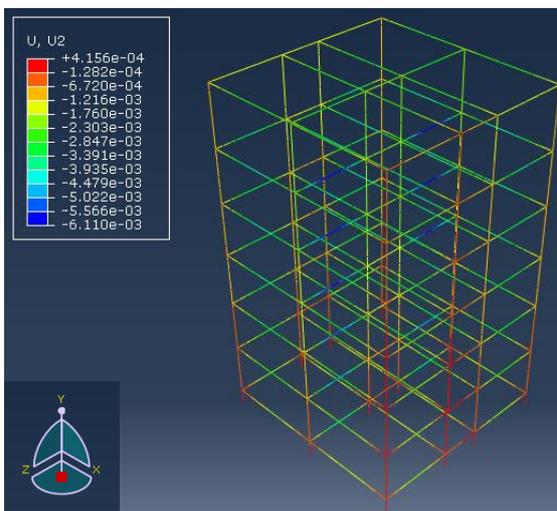


Figura 3.8 Deslocamento segundo Y global (Abaqus)

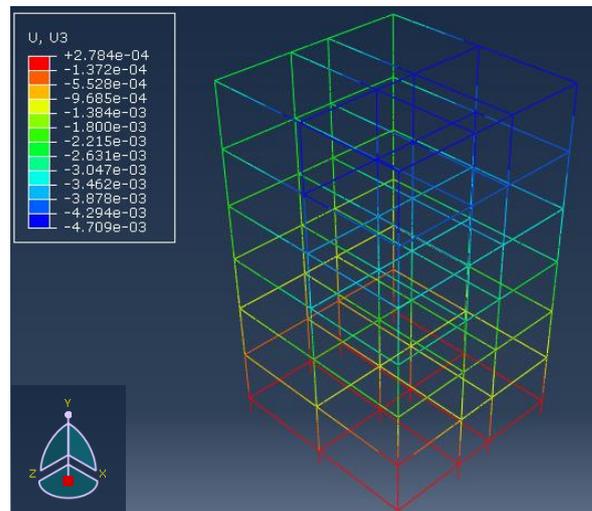


Figura 3.9 Deslocamento segundo Z global (Abaqus)

### 3.5.1 Módulo 1

Para a situação de incêndio no módulo 1 são apresentados os diagramas de esforços e os deslocamentos para o minuto 87, que corresponde ao instante dos deslocamentos máximos.

Os valores correspondentes ao fim da aplicação da carga de incêndio estão apresentados no Anexo B.

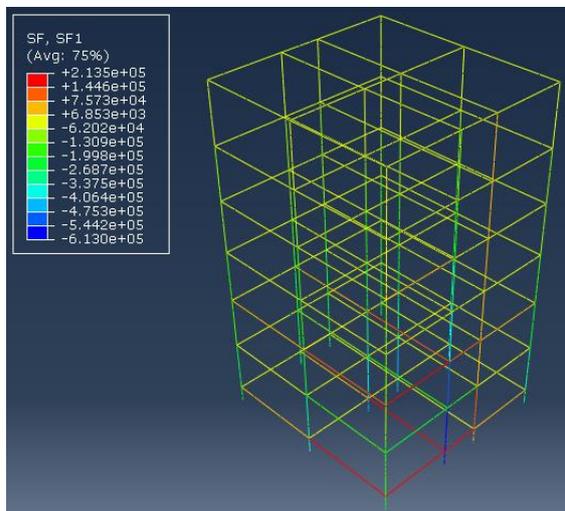


Figura 3.10 Esforço axial (Abaqus)

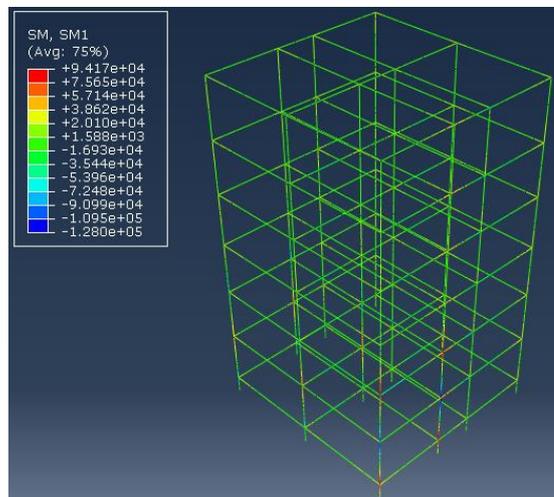


Figura 3.11 Momento fletor em torno de X local (Abaqus)

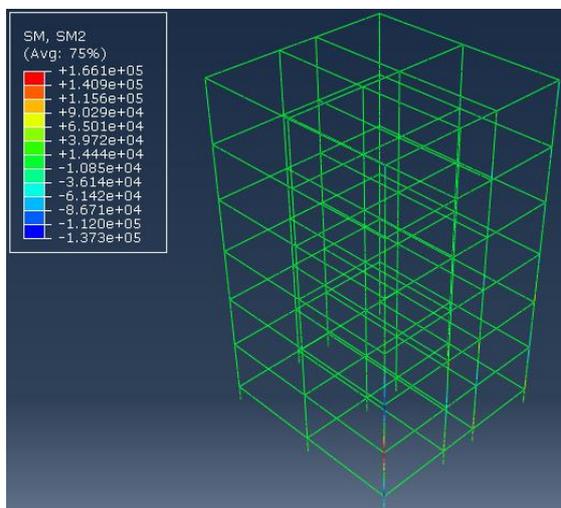


Figura 3.12 Momento em torno de Y local (Abaqus)

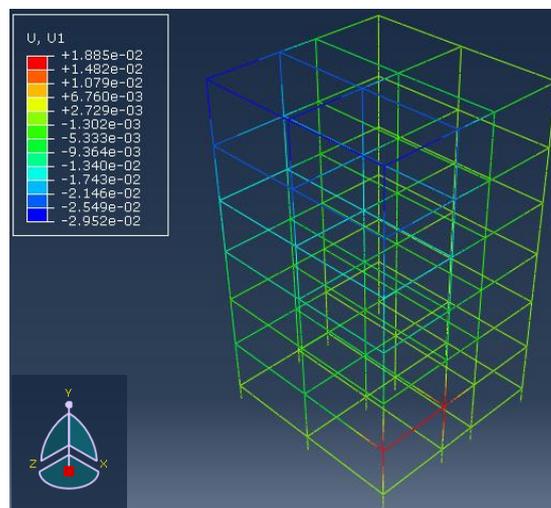


Figura 3.13 Deslocamento segundo X global (Abaqus)

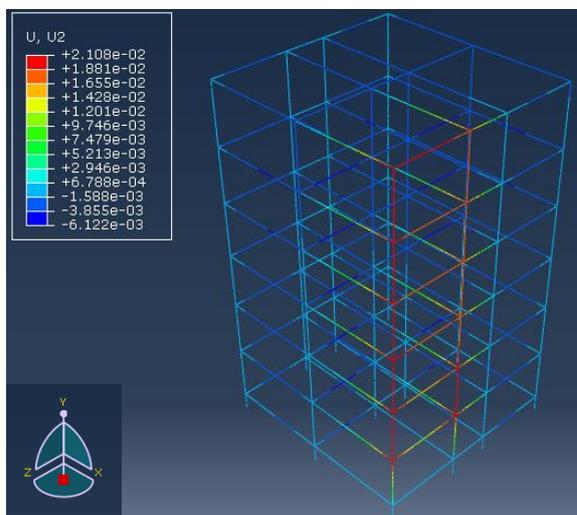


Figura 3.14 Deslocamento segundo Y global (Abaqus)

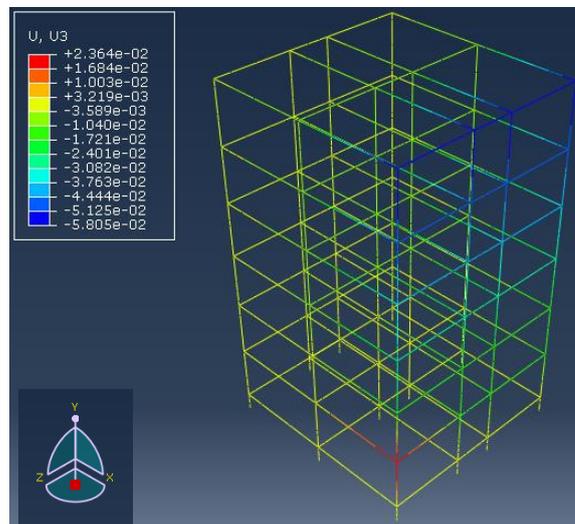


Figura 3.15 Deslocamento segundo Z global (abaqus)

### 3.5.2 Módulo 2

Quando a situação de incêndio analisada é no módulo 2 o instante onde ocorrem os deslocamentos máximos é ao minuto 87, sendo os diagramas de esforços (Figura 3.16 à Figura 3.18) assim como os deslocamentos (Figura 3.19 à Figura 3.21) apresentados nas imagens seguintes referentes a este instante. Os diagramas e deslocamento referentes a análise final da situação de incêndio estão representados no Anexo C.

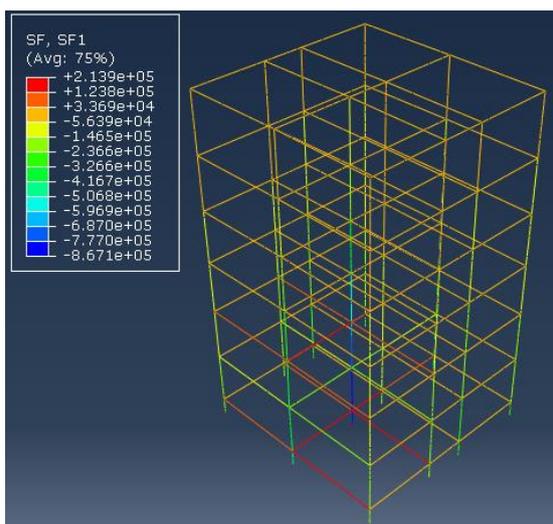


Figura 3.16 Esforço axial (Abaqus)

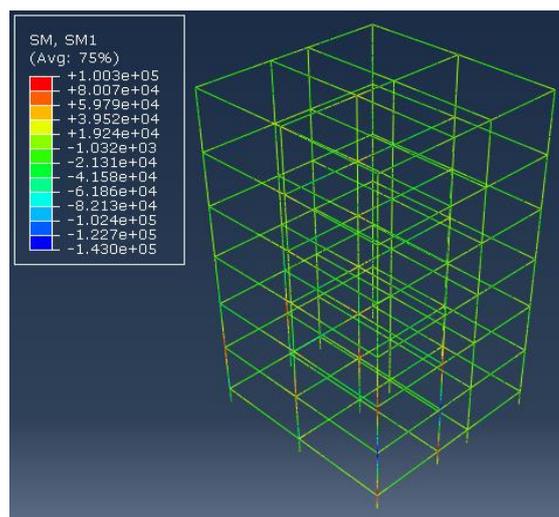


Figura 3.17 Momento fletor em torno de X local (Abaqus)

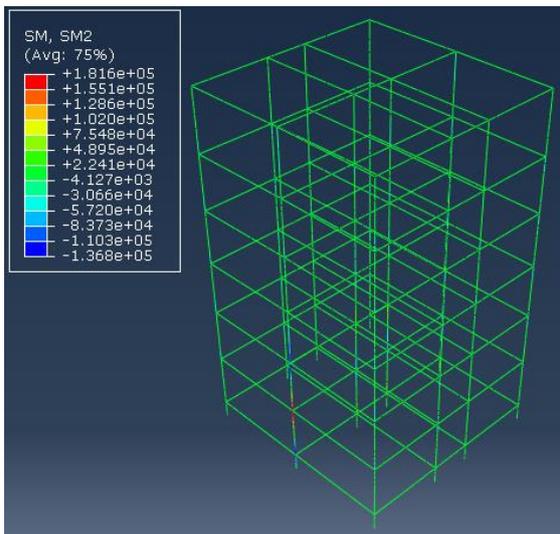


Figura 3.18 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus)

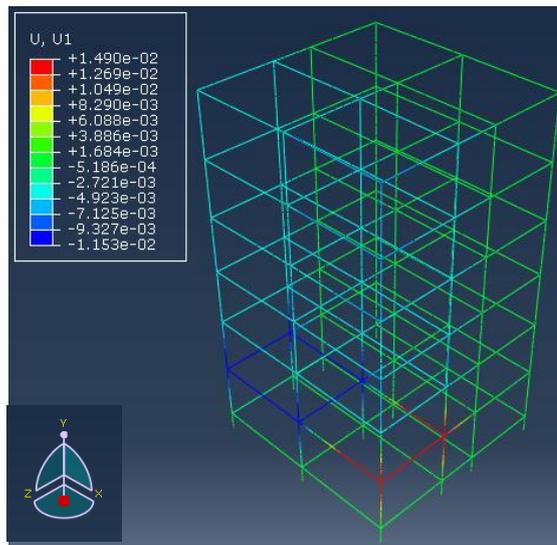


Figura 3.19 Deslocamento segundo X global (Abaqus)

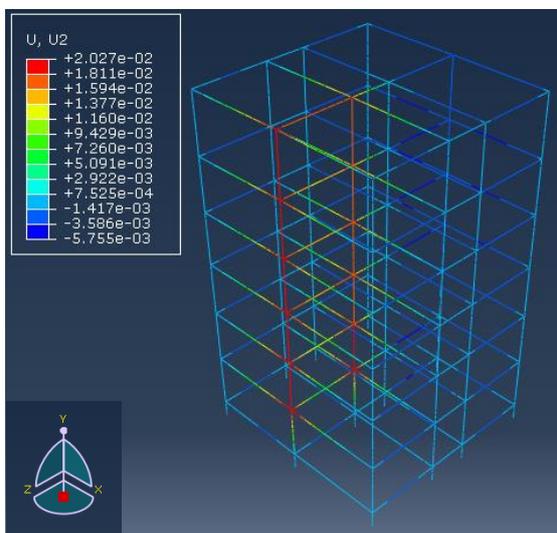


Figura 3.20 Deslocamento segundo Y global (Abaqus)

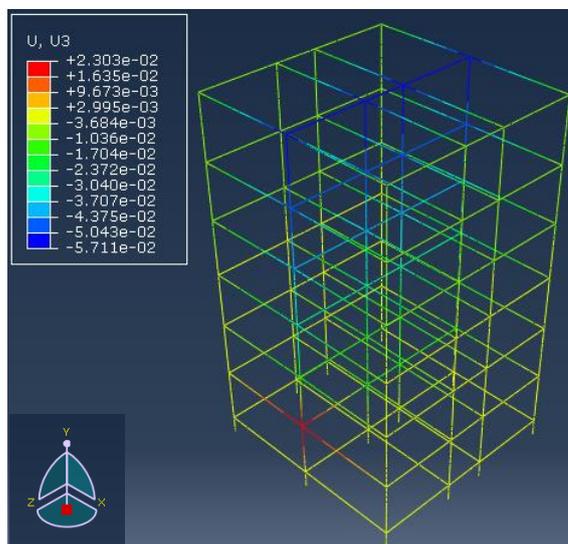


Figura 3.21 Deslocamento segundo Z global (Abaqus)

## 4 Dimensionamento

### 4.1 Introdução

A verificação da resistência de estruturas ao fogo pode ser feita em três níveis, verificação por elementos, verificação de partes da estrutura ou verificação da estrutura global, estando estes referidos por ordem crescente de complexidade.

O método de verificação utilizado foi o primeiro, por elementos, sendo esta suficiente para a verificação de elementos sujeitos à curva de incêndio ISO834 (ISO 834-1, 1999) ou como foi o caso utilizado neste estudo a curva de incêndio natural segundo Eurocódigo 1 parte 1-2 (CEN 2010a).

A verificação pode ser feita em três domínios diferentes:

Domínio do tempo:

$$t_{fi,d} \leq t_{fi,requ} \quad (23)$$

Domínio da resistência:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (24)$$

Ao longo do tempo  $t_{fi,requ}$

Domínio da temperatura:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (25)$$

Durante o tempo  $t_{fi,requ}$

Sendo:

$t_{fi,d}$  o valor de cálculo da resistência ao fogo, ou seja, a duração do incêndio necessária para que o elemento de aço atinja a temperatura crítica

$t_{fi,requ}$  resistência ao fogo requerida regulamentarmente;

$\theta_d$  valor de cálculo da temperatura do elemento;

$\theta_{cr,d}$  valor de cálculo da temperatura crítica do elemento.

## 4.2 Domínio da resistência

### 4.2.1 Classificação das secções transversais

A classificação das secções transversais é feita da mesma forma como nas situações normais sendo apenas reduzido o valor de  $\varepsilon$  como é indicado na equação seguinte:

$$\varepsilon = 0,85[235/f_y]^{0,5} \quad (26)$$

Sendo  $f_y$  a tensão de cedência a 20 °C.

### 4.2.2 Vigas com secções transversais da Classe 1 ou da Classe 2

O valor de cálculo do momento resistente  $M_{fi,\theta,Rd}$  numa secção com temperatura uniforme  $\theta_a$  é calculado por (CEN 2010):

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad (27)$$

Onde:

$M_{Rd}$  valor de cálculo do momento plástico resistente da secção transversal bruta  $M_{pl,Rd}$  à temperatura normal;

$k_{y,\theta}$  fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura  $\theta_a$  atingida no instante  $t$ .

### 4.2.3 Elementos com secções transversais das classes 1 ou 2, sujeitos a flexão composta com compressão

Um elemento sujeito a flexão composta com compressão deve satisfazer as expressões seguintes para verificar a resistência à encurvadura  $R_{fi,t,d}$  no instante  $t$  (CEN 2010).

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (28)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (29)$$

Sendo:

$$\chi_{min,fi} = \min[\chi_{y,fi}, \chi_{z,fi}] \quad (30)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad (31)$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta] \quad (32)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} \quad (33)$$

Onde:

$\chi_{fi}$  coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio;

$k_{y,\theta}$  fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura  $\theta_a$  atingida no instante  $t$ .

Sendo o valor da esbelteza normalizada  $\bar{\lambda}_\theta$  para a temperatura  $\theta_a$  calculado por:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} [k_{y,\theta}/k_{E,\theta}]^2 \quad (34)$$

Em que:

$k_{E,\theta}$  fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico a temperatura do aço  $\theta_a$ , atingida no instante  $t$ .

O comprimento de  $l_{fi}$  de um pilar em situação de incêndio pode ser considerado como 0,7 do comprimento  $L$  do pilar no caso de pilares no último andar ou de  $0,5L$  para pilares em pisos intermédios ou no piso térreo sendo um apoio encastrado.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (35)$$

onde:

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (36)$$

Para o eixo de maior inércia:

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (37)$$

$$\mu_y = (2\beta_{M,y} - 5) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} + 0,29 \leq 0,8 \quad (38)$$

Para o eixo de menor inércia:

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (39)$$

$$\mu_z = (1,2\beta_{M,z} - 3) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71\beta_{M,z} + 0,29 \leq 0,8 \quad (40)$$

Os coeficientes de momento uniforme equivalente  $\beta_M$  são calculados como está representado na Figura 4.1, parte da Figura 4.2 retirada do Eurocódigo 3, parte 1-2 (CEN, 2010b).

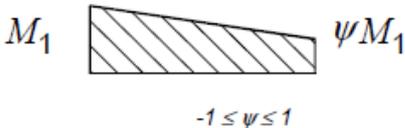
Diagrama de momentos	Coefficiente de momento uniforme equivalente $\beta_M$
<p>Momentos nas extremidades</p>  <p><math>M_1</math> <math>\psi M_1</math></p> <p><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \psi$

Figura 4.1 Coeficientes de momento uniforme equivalente (CEN, 2010b)

#### 4.2.4 Temperatura crítica

O cálculo da temperatura crítica  $\theta_{a,cr}$ , segundo, Eurocódigo 3 parte 1-2, é fundamental na verificação da resistência. A temperatura crítica é calculada, para um qualquer grau de utilização  $\mu_0$  no instante  $t = 0$ , pela seguinte fórmula (CEN, 2010b):

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \left[ \frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (41)$$

Para elementos de secção transversal de classe 1, 2 ou 3 o grau de utilização  $\mu_0$  no instante  $t = 0$  pode ser obtido por:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (42)$$

Onde:

$R_{fi,d,0}$  valor de  $R_{fi,d,t}$ , para  $t = 0$ ;

$E_{fi,d}$  valor de cálculo dos efeitos das ações e situação de incêndio;

$R_{fi,d,t}$  correspondente valor de cálculo da resistência do elemento de aço em situação de incêndio, no instante  $t$ .

### 4.3 Verificação

#### 4.3.1 Elementos Avaliados

Pelo programa Elefir EN é possível efetuar as verificações dos elementos em situação de incêndio sendo necessário apenas os valores dos diagramas de momento fletor e esforço axial atuante nas várias barras.

Os diagramas foram obtidos recorrendo ao Abaqus. Calculando a estrutura com o carregamento da combinação de acidente, no instante antes da aplicação da ação térmica, assim, os valores dos diagramas são iguais para a verificação dos elementos independentemente da localização do incêndio. Para esta verificação foram atribuídos números às várias barras que estão na envolvente dos módulos 1 e 2, para saber quais as barras a serem verificadas.

Pela Figura 4.2 vemos que o pilar 1 e 5 são afetados pelo incêndio no módulo 2 já os pilares 6 e 7 são afetados pelo incêndio no módulo 1; por sua vez a viga 3 é afetada pelo módulo 2 e a viga 8 pelo módulo 1. Já a viga 2 é metade a metade direita afetada pelo módulo 1 e a outra

metade pelo módulo 2; o mesmo acontece na viga 4, onde a metade direita sofre a influência do módulo 1 e a metade esquerda a do módulo 2.

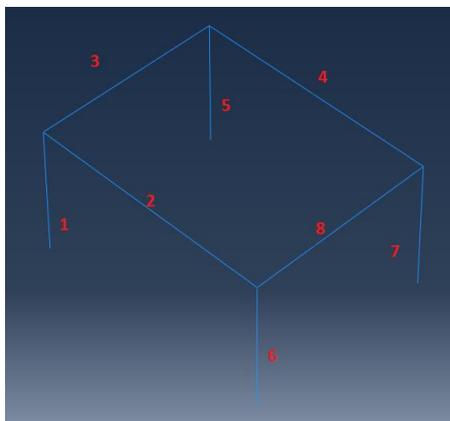


Figura 4.2 Número dos elementos da envolvente dos módulos 1 e 2

Os diagramas resultantes da combinação de acidente estão representados da Figura 4.3 até Figura 4.6, estando todos eles em Newtons [N].

O valor de RF1 corresponde ao esforço axial, já o SM1 corresponde ao momento fletor em torno do eixo y, sendo SM2 o momento fletor em torno de z. O referencial apresentado é válido da Figura 4.3 à Figura 4.5.

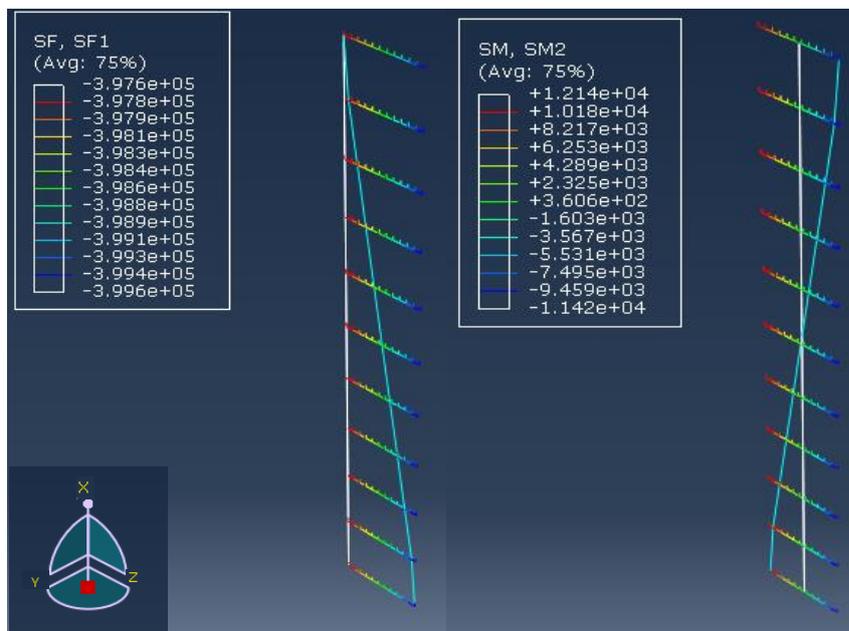


Figura 4.3 Diagrama de esforço axial e Momento fletor pilar 5 (Abaqus)

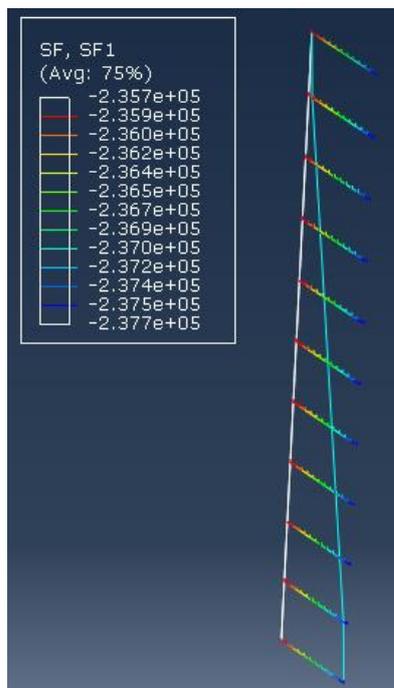


Figura 4.4 Diagrama de esforço axial pilar 7 (Abaqus)

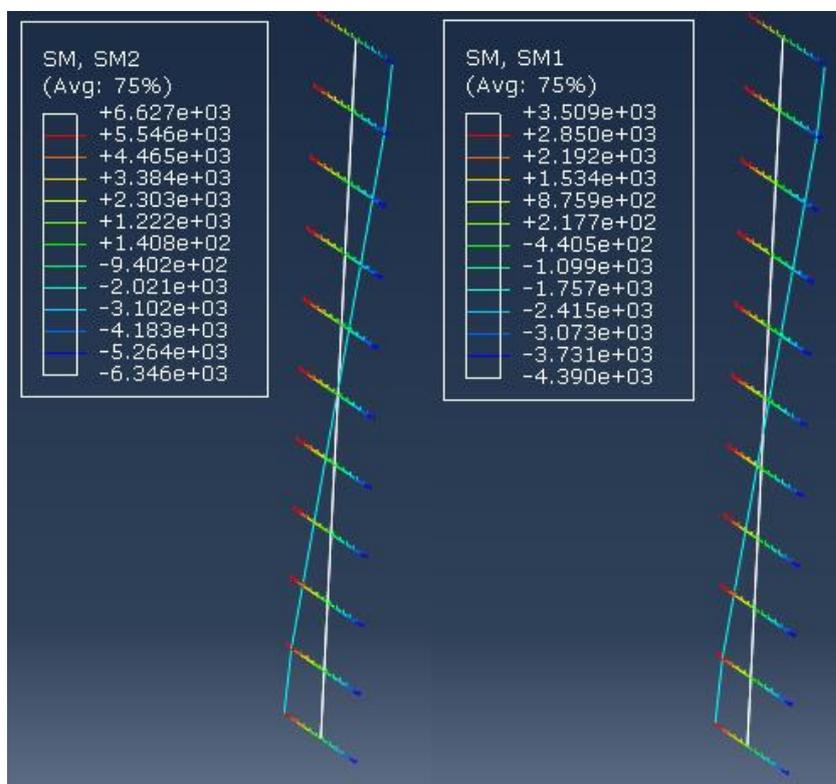


Figura 4.5 Diagrama de momento SM1 e SM2 do pilar 7 (Abaqus)

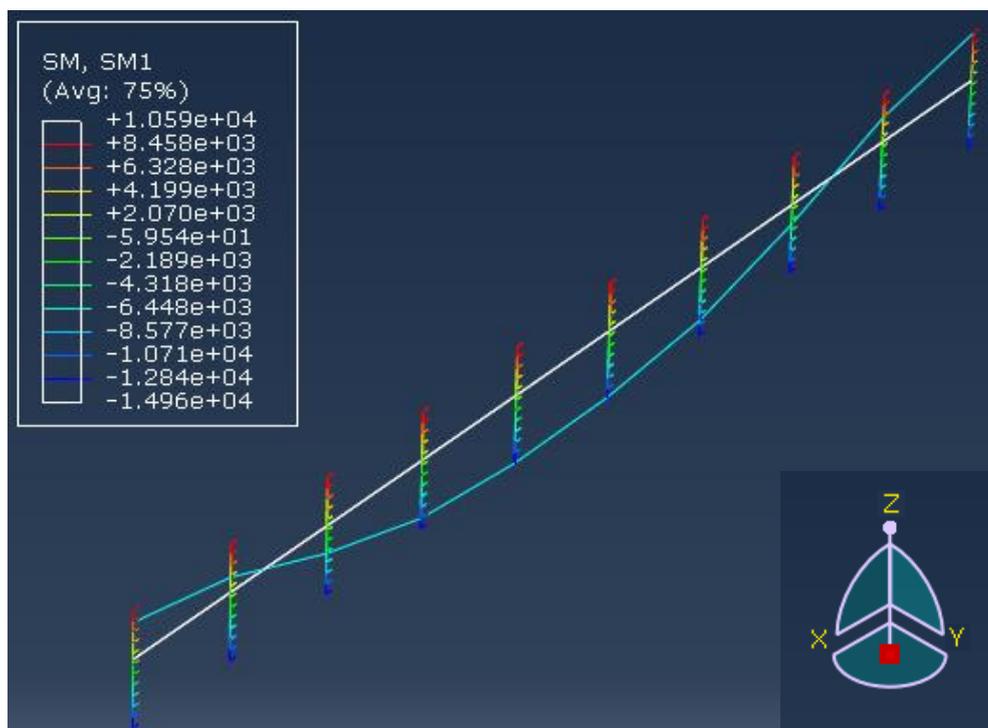


Figura 4.6 Diagrama SM1 Viga 8 (Abaqus)

### 4.3.2 Pilar 5

A verificação foi feita recorrendo ao Elefir EN, escolhendo a opção de elementos submetidos a flexão e compressão, o programa permite o cálculo da temperatura crítica em função do carregamento, assim como a encurvadura em função da temperatura máxima atingida pelo perfil e já anteriormente calculada recorrendo a este mesmo programa.

O primeiro passo foi inserir os esforços: diagrama de momento fletor e esforço axial da Figura 4.2; assim como os dados geométricos do perfil: i) comprimento do pilar 3010 mm, assim como o ii) comprimento de encurvadura que no caso de pisos intermédios ou pisos térreos com apoios encastrados corresponde a 0,5 L.

Como se vê pela Figura 4.7, o programa calcula a temperatura crítica para a encurvadura do elemento assim como a temperatura crítica para a secção transversal sendo o menor valor o mais condicionante; o programa calcula ainda a classe da secção (Figura 4.7 à Figura 4.9).

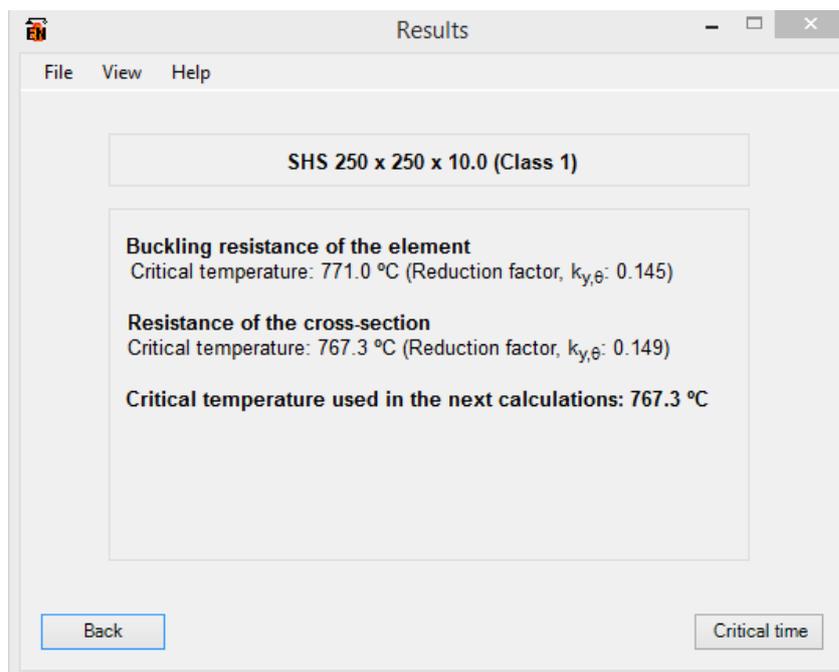


Figura 4.7 Verificação da temperatura crítica do pilar 5 (domínio da temperatura) (Elefir EN)

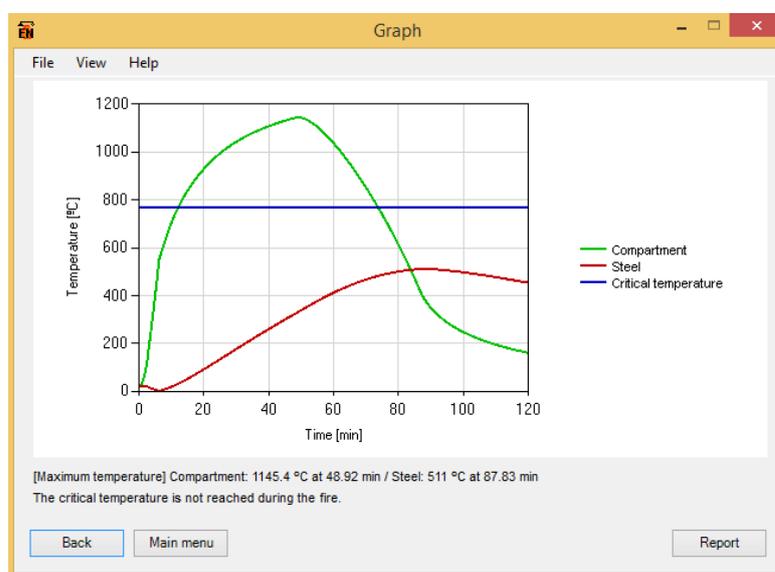


Figura 4.8 Temperatura crítica pilar 5, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN)

Como podemos verificar o valor da temperatura crítica nunca é atingido no perfil metálico.

Nota: neste cálculo o valor máximo da temperatura no perfil metálico não foi o mesmo valor que o programa havia calculado no subcapítulo 2.3 isto foi devido a um erro do programa uma vez que todas as características foram as mesmas utilizadas anteriormente.

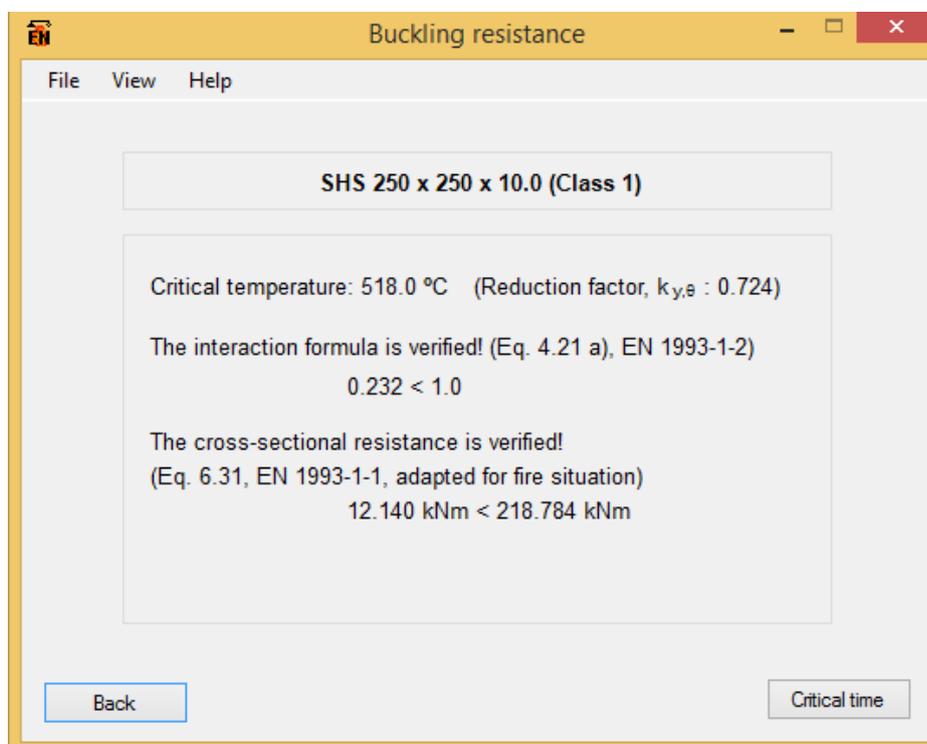


Figura 4.9 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN)

Neste cálculo o valor de temperatura máxima do perfil metálico utilizado foi o calculado no subcapítulo 2.3 e não o que o programa havia calculado para a temperatura crítica e apresentado na Figura 4.8

Como se pode verificar ao longo de toda a análise o pilar está em segurança.

#### 4.3.3 Pilar 7

A verificação do pilar 7 foi efetuada da mesma forma que a do pilar 5 com a única diferença que neste caso existe um momento fletor atuante segundo as duas direções, tendo o valor destes momentos de ser tido em conta para as verificações (Figura 4.10 à Figura 4.12). Todos os restantes dados são iguais aos utilizados no pilar 5.

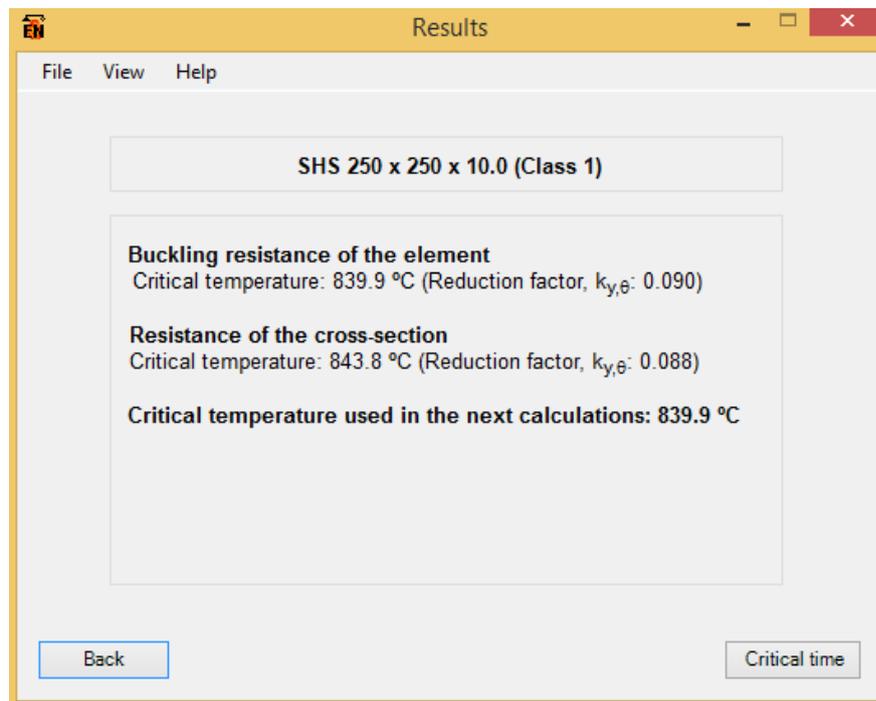


Figura 4.10 Cálculo da temperatura crítica em função do carregamento do pilar 7 (domínio da temperatura) (Elefir EN)

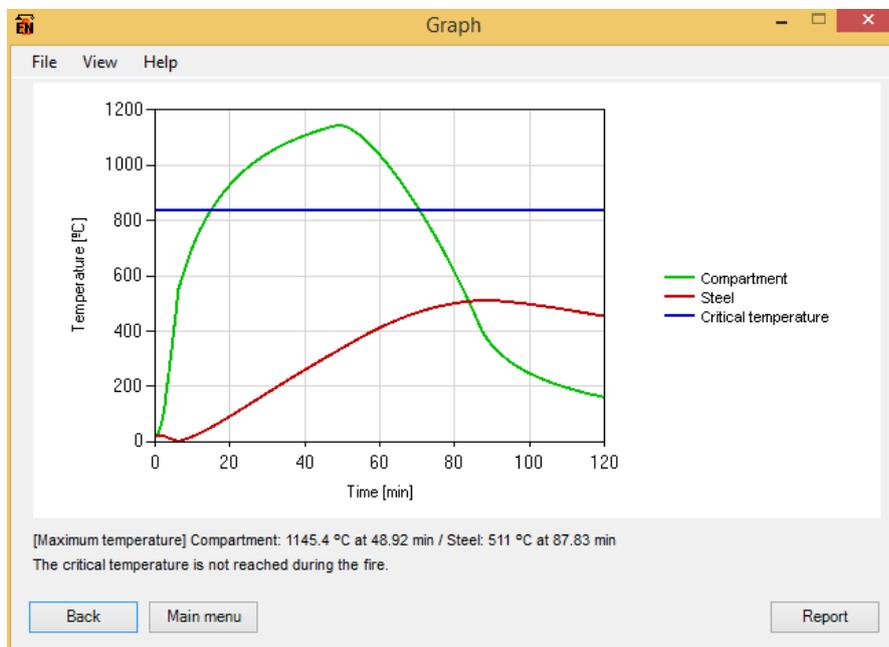


Figura 4.11 Temperatura crítica pilar 7, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN)

Nota: mais uma vez o novo valor de temperatura máxima do perfil diverge ligeiramente do que o programa havia calculado anteriormente tendo-se utilizado o valor calculado pelo programa no subcapítulo 2.3.

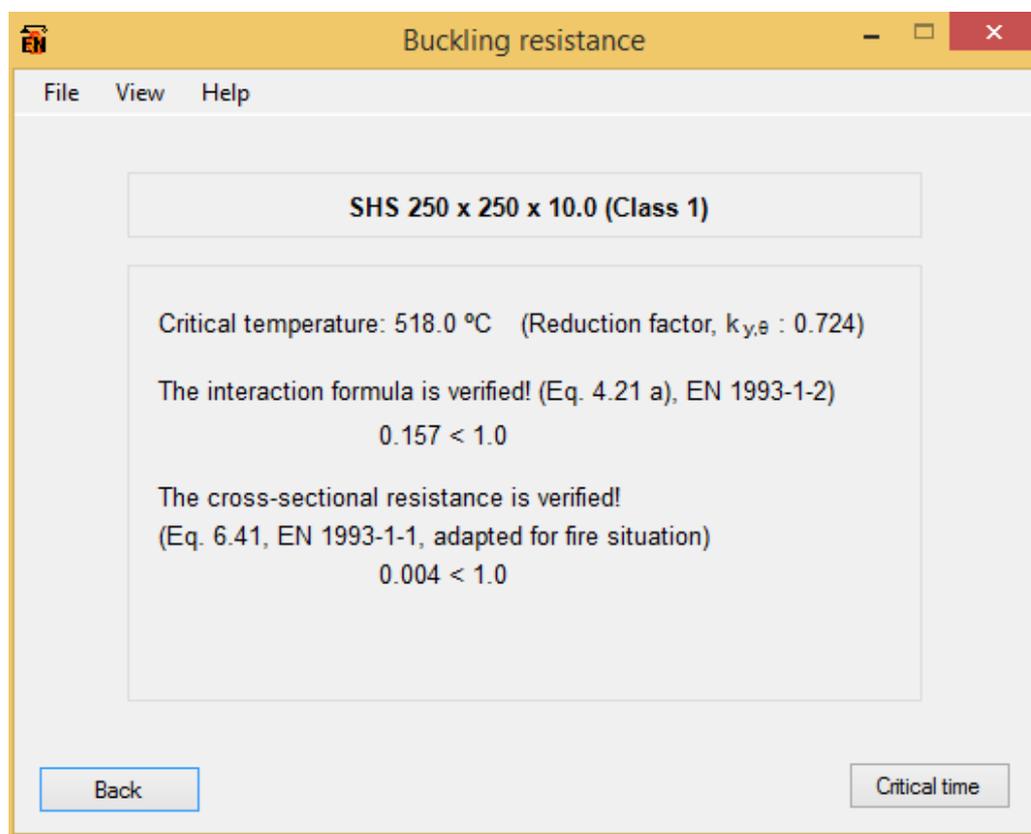


Figura 4.12 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN)

Como se pode verificar o pilar 7 está em segurança, sendo o valor da interação de 0,157.

#### 4.3.4 Viga 8

Para a verificação da viga 8 foi usada a análise de um elemento submetido unicamente a flexão, uma vez que a viga não pode sofrer instabilidade lateral. Pois está contra ventada pelos módulos (Figura 4.13 à Figura 4.15).

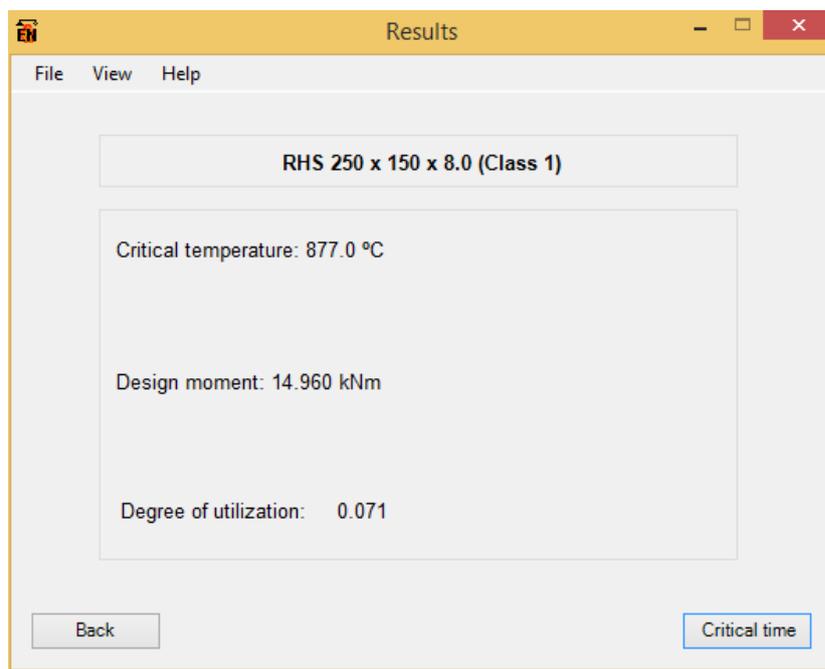


Figura 4.13 Cálculo da temperatura crítica para o carregamento atuante na viga 8 (domínio da temperatura) (Elefir EN)

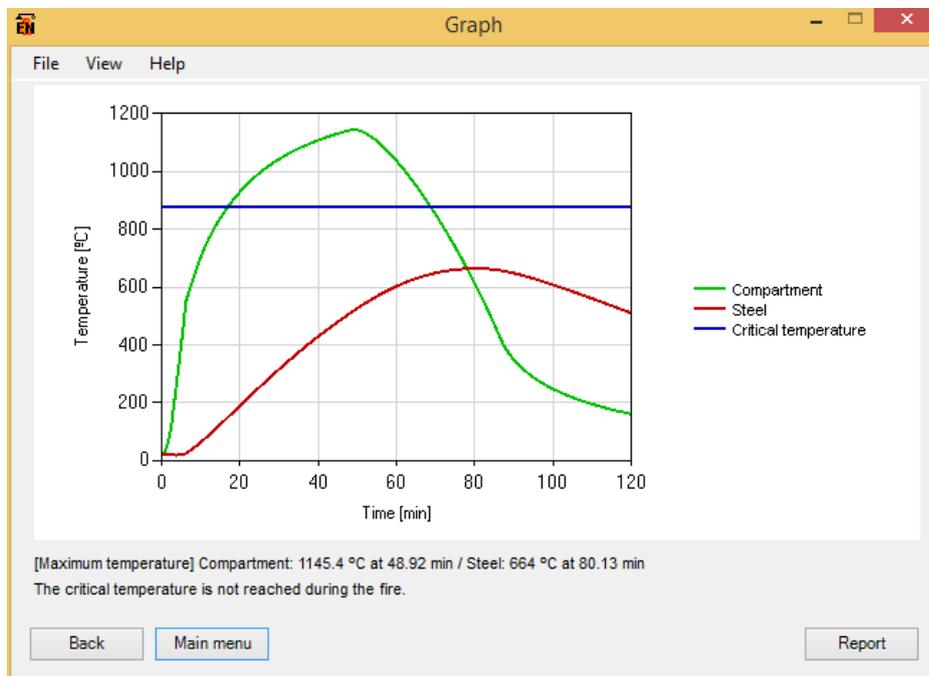


Figura 4.14 Temperatura crítica viga 8, temperatura do compartimento e perfil metálico (domínio da temperatura) (Elefir EN)

Nota: como anteriormente a temperatura voltou a não corresponder à temperatura de cálculo no subcapítulo 2.3, sendo a temperatura de cálculo do subcapítulo 2.3 a utilizada para a verificação da resistência da secção.

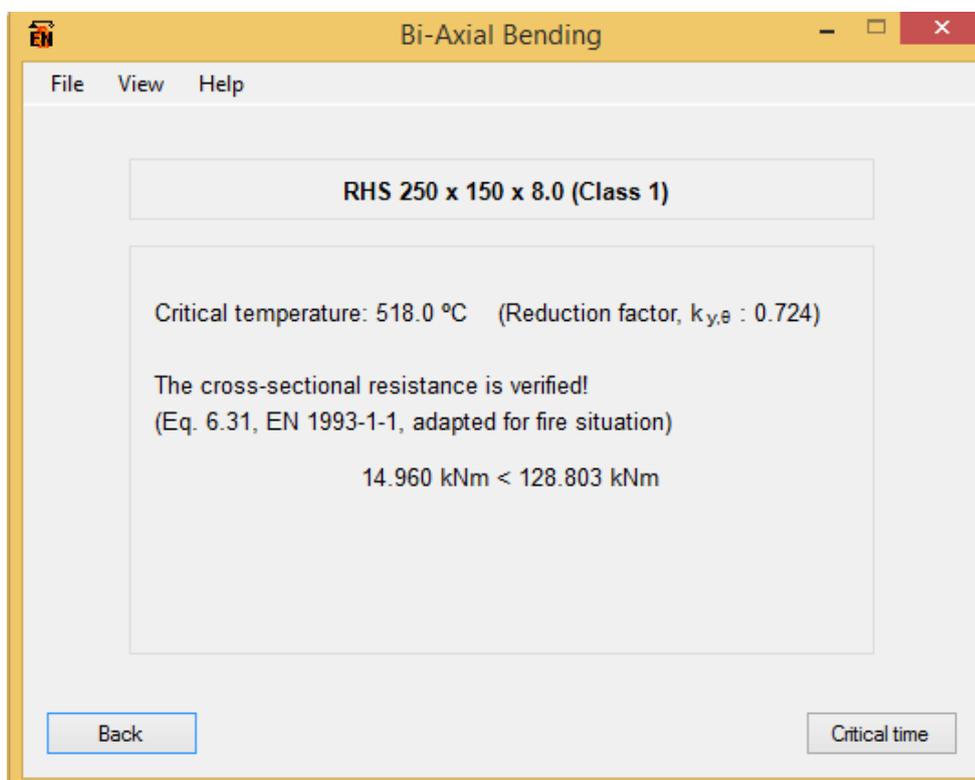


Figura 4.15 Verificação da secção transversal para a temperatura máxima (domínio da resistência) (Elefir EN)

## 5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

O estudo desenvolvido nesta tese teve como objetivo a verificação da segurança da estrutura do edifício FRAMEUP quando sujeito à ação de um incêndio num dos seus módulos. As verificações de segurança foram feitas com base no Eurocódigo 3 Parte 1-2 (CEN, 2010b).

De acordo com o regulamento indicado, a verificação da segurança em estruturas metálicas expostas ao fogo pode ser feita no domínio da resistência, no domínio do tempo e no domínio da temperatura, sendo apenas uma destas verificações precisa garantir a segurança da estrutura.

Apesar disto, neste estudo foram efetuadas verificações no domínio da temperatura e no domínio da resistência.

Ao longo do estudo foi necessário recorrer a simplificações na representação das condições reais do incêndio; estas simplificações foram efetuadas por força das limitações de alguns dos programas de cálculo utilizados. Todas estas simplificações efetuadas foram para que a situação apresentada fosse mais gravosa que a situação real; como foi a exposição ao fogo dos pilares, as camadas que fazem proteção aos perfis e a representação das paredes do compartimento; podendo assim chegar ao fim do trabalho e garantir que as opções tomadas nos permitem afirmar que a estrutura está em segurança.

Estas simplificações levam no entanto a outro problema que é o sobredimensionamento dos elementos, sendo este um problema muito importante atualmente, onde a concorrência do mercado obriga a um dimensionamento muito rigoroso, para ser apresentado o preço final mais baixo possível garantindo ainda assim todas as condições de segurança.

Com a análise feita na situação de incêndio no módulo 1 e módulo 2, chegou-se à conclusão que a estrutura se encontra em segurança; tendo sido o maior valor de interação de 0.232, para o pilar 5.

Uma dos trabalhos futuros que pode ser desenvolvido após projeto passa por um dimensionamento mais rigoroso, nomeadamente no que se refere às condições de transferência de calor entre o compartimento de incêndio e os perfis metálicos, assim como um cálculo mais correto da temperatura dentro do compartimento de incêndio. Estes cálculos podem ser feitos recorrendo a análise numéricas térmicas e a análises FDS (fire development simulations).

Um outro estudo que teria interesse ser desenvolvido no futuro seria uma análise de propagação também conhecida como “*travelling fire*” onde a situação de incêndio não se limita a decorrer um módulo isoladamente, mas se propaga de um módulo para os módulos na vizinhança, devido às aberturas existentes entre eles.

## Referências bibliográficas

ABAQUS – Theory Manual & Users Manuals, v. 6.11, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 2011

CEAM-UFGM@, <https://www.sites.google.com/site/acoufmg/home/historico> . Último acesso: 8 de Janeiro de 2015.

CEN (2009) “Eurocódigo – Bases para projeto de estruturas”. EN 1990, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

CEN (2010a) “Eurocódigo 1 – Ações em estruturas, Parte 1-2: Ações gerais, ações em estruturas expostas ao fogo”. EN 1991-1-2, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

CEN (2010b) “Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais, verificação da resistência ao fogo”. EN 1993-1-2; Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

FERPINTA@ (2014). <http://www.ferpinta.pt/index.php?cat=61> . Último acesso em 22 de Dezembro de 2014.

FRAMEUP (2013) - Optimization of frames for effective assembling – Workpackage 3- Performance based assessment of a new skeletal system and robustness – DELIVERABLE 8 (D8), Universidade de Coimbra

(ISO 834-1, 1999) “Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements”, International Standard, 1 st Edition, 1999.

LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, “Verificação da Segurança de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado em Relação à Ação do Fogo”, 1990

Mendes, A. J. (2014) “Análise Sísmica *Pushover* de Pórticos Metálicos com Elementos Tubulares”. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Monteiro S.F. (2013) “Sustainability of 3D Modular Steel Intensive Building of Student’s Residence”. Dissertation submitted for the degree of master of environmental engineering in

the specialty in Territory and Environmental Management. Faculdade de Ciências e Tecnologias de Coimbra.

Simões, R. (2014). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”. Coleção Construção Metálica e Mista, cmm Press, Coimbra.

Silva, T. A. O. (2014) “Estudo de ligações viga-pilar usando perfis retangulares ou quadrados ocos” Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de mecânica Estrutural. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

The Design Fire Tool OZone V2.0 – Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests, Cadorin. J. F., Pintea D.,Franssen J. M., University of Liège 2009

Vila Real, P. (2003). “Incêndio em Estruturas Metálicas Cálculo Estrutural”. Alfragide: Edições Orion.

Vila Real, P. e Franssen, J. M. – Elefir-EN V1.5.4, Software para Dimensionamento ao Fogo de Estruturas de Aço de acordo com Eurocódigo 3, 2014. <http://elefiren.web.ua.pt>

Wikipédia@ (2015). [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_Pedro\\_e\\_In%C3%AAs](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Pedro_e_In%C3%AAs). Último acesso em 26 de Janeiro de 2015.

## Anexos

### A - Ações na estrutura

Neste anexo esta representado todos os casos simples de carga utilizados na modelação da estrutura no *Abaqus*.

Peso próprio da estrutura

Peso próprio dos módulos, 4 toneladas cada (Figura A.1)

Peso próprio dos corredores, 0,5 kN/m<sup>2</sup> (Figura A.2)

Peso próprio das fachadas, 0,5 kN/m<sup>2</sup> (Figura A.3)

Peso próprio da cobertura (painel sandwich), 0,5 kN/m<sup>2</sup> (Figura A.4)

Peso próprio da barreira de proteção ao fogo, 0,5 kN/m<sup>2</sup> (Figura A.5)

Sobrecarga de categoria A, 2,0 kN/m<sup>2</sup> (Figura A.6)

Neve (figura A.7)

Imperfeições geométricas 0°, direção Z (Figura A.8)

Imperfeições geométricas 90°, direção X (Figura A.9)

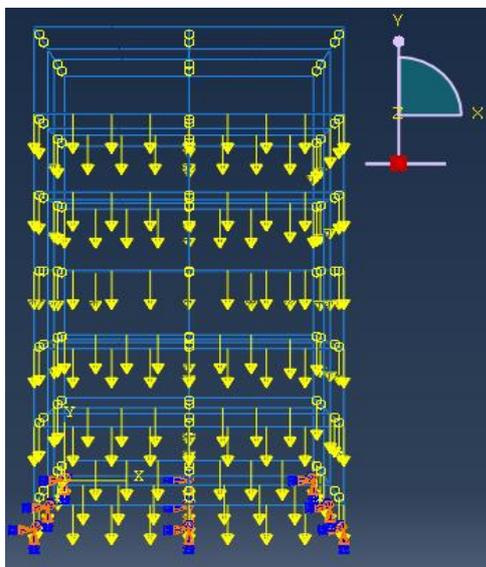


Figura A.1 Pp módulos

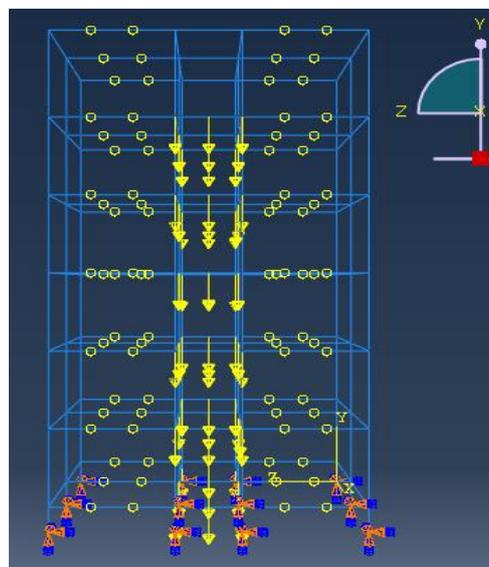


Figura A.2 Pp corredores

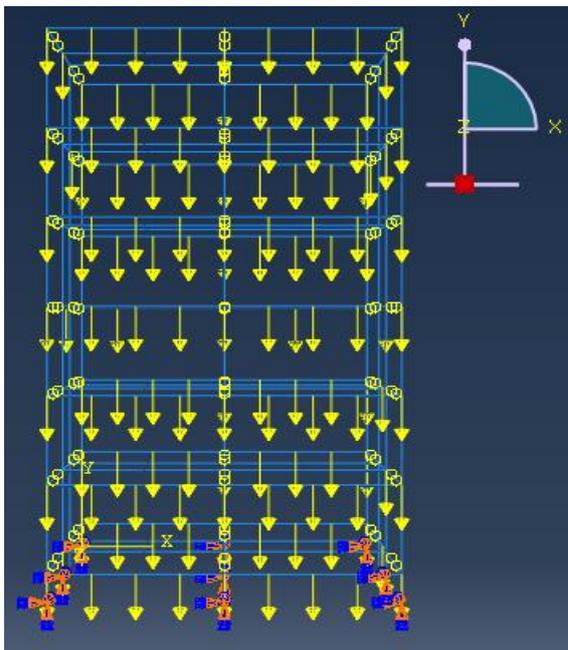


Figura A.3 Pp fachadas

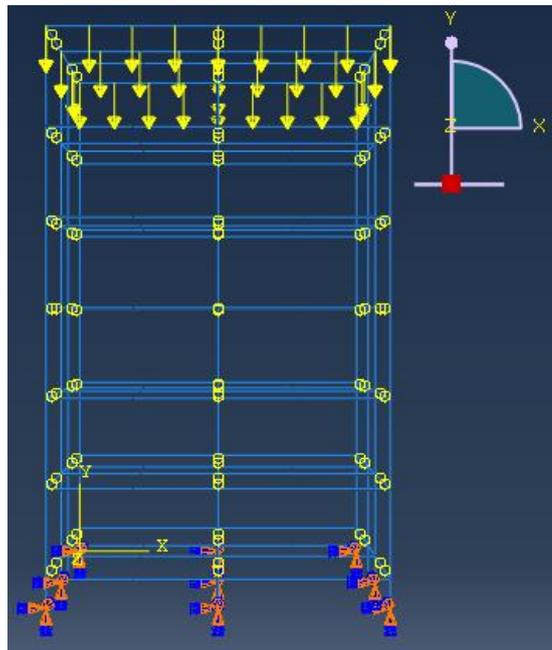


Figura A.4 Pp cobertura

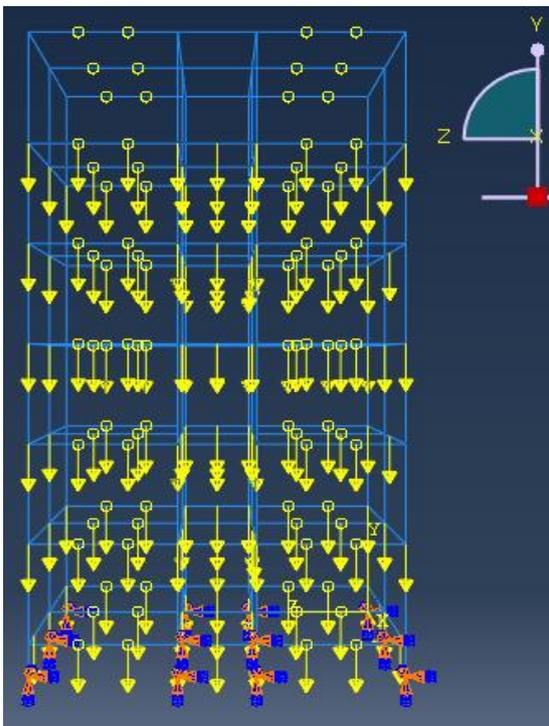


Figura A.5 Pp barrei de proteção ao fogo

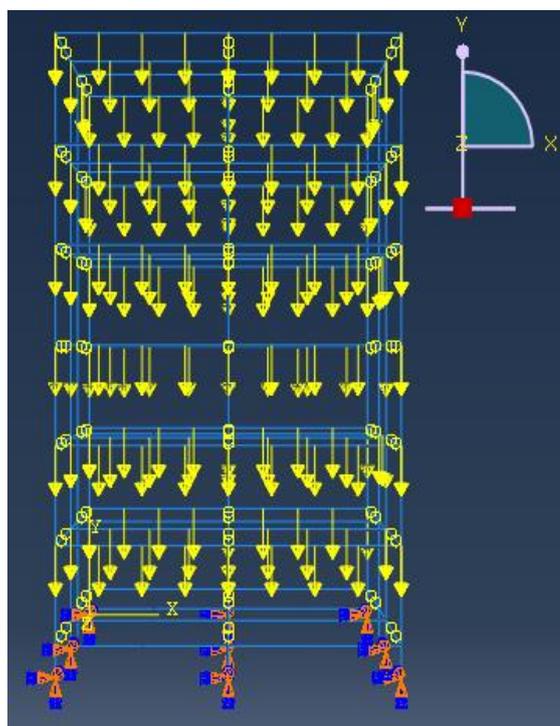


Figura A.6 Sobrecarga

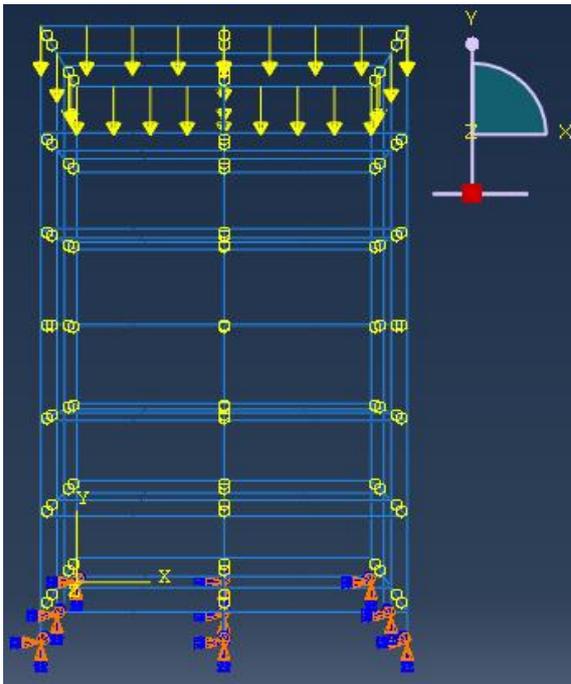


Figura A.7 Neve

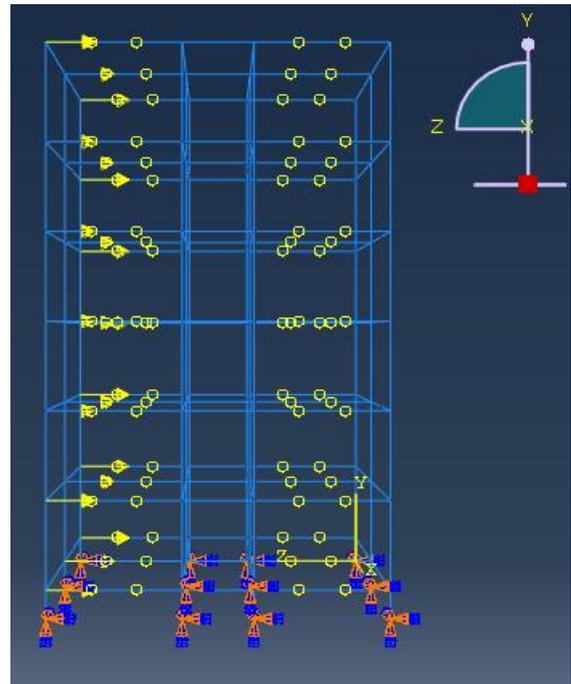


Figura A.8 Imperfeições geométricas 0°

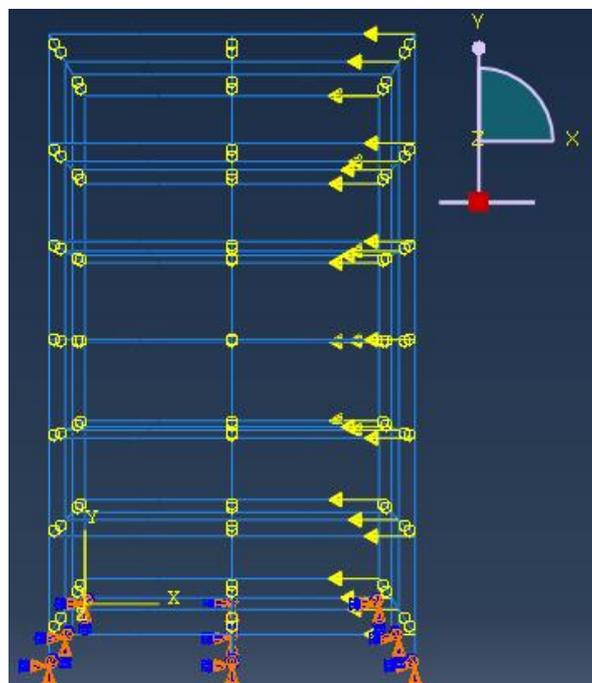


Figura A.9 Imperfeições geométricas 90°

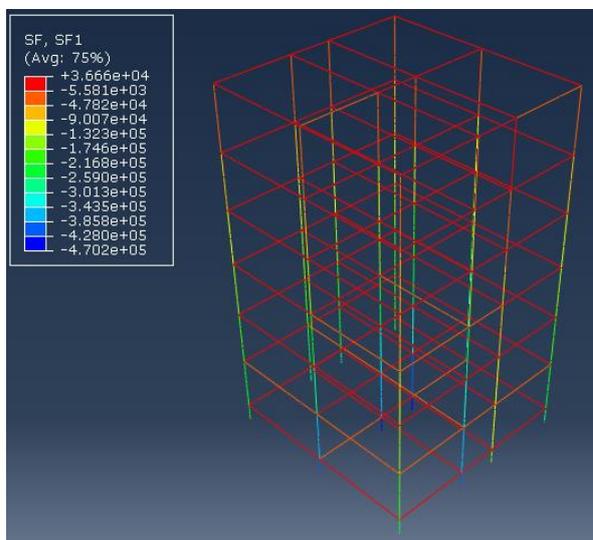
**B – diagramas de esforços e deslocamentos no final do incêndio no módulo 1**

Figura B.1 Esforço axial (Abaqus)

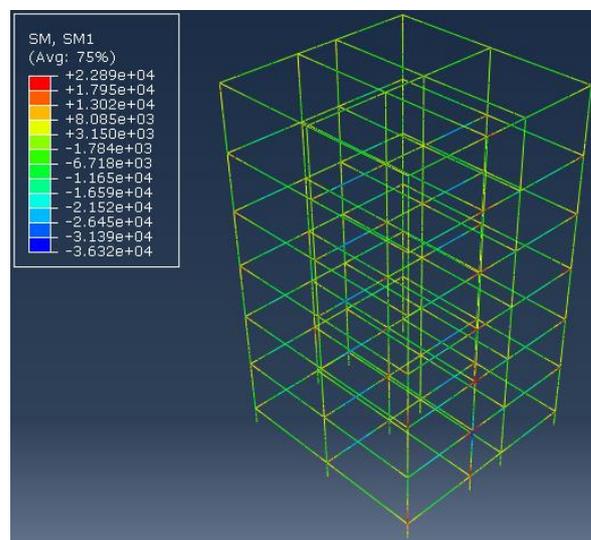


Figura B.2 Momento fletor em torno de X Local (Abaqus)

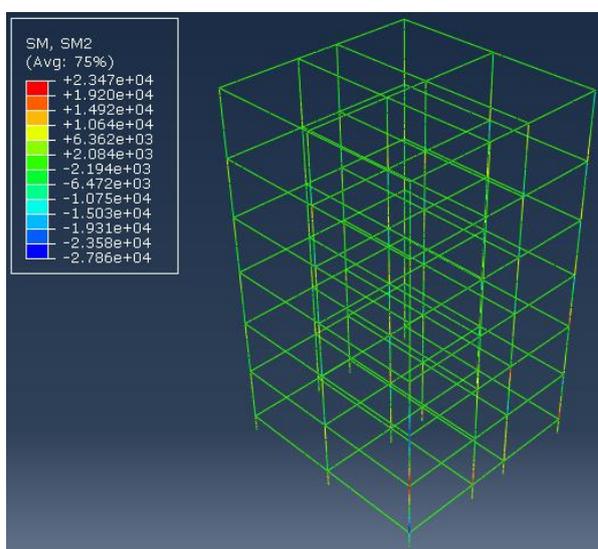


Figura B.3 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus)

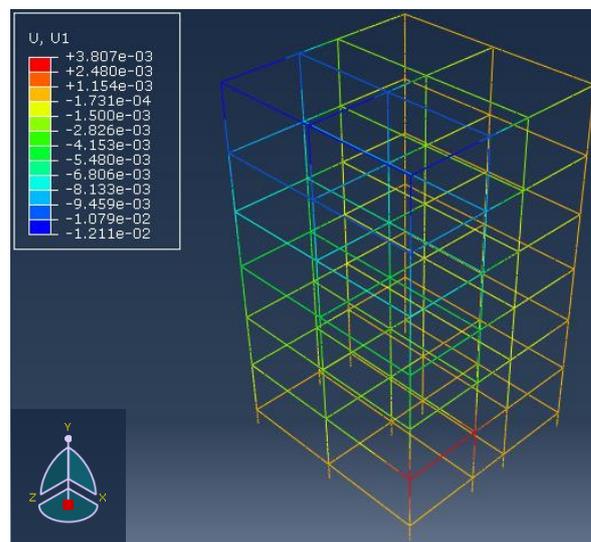


Figura B.4 Deslocamento segundo X global (Abaqus)

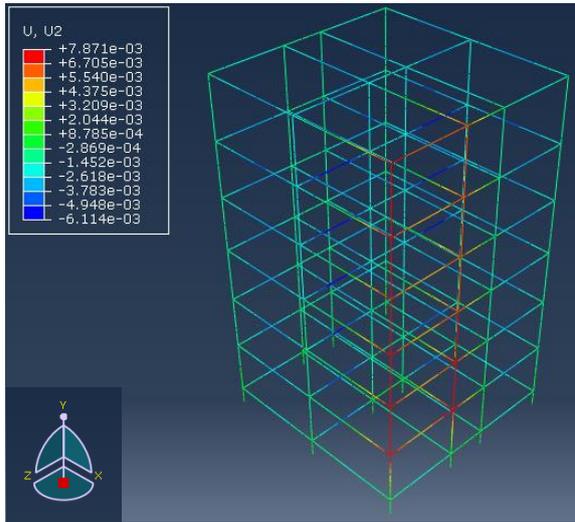


Figura B.5 Deslocamento segundo Y global  
(Abaqus)

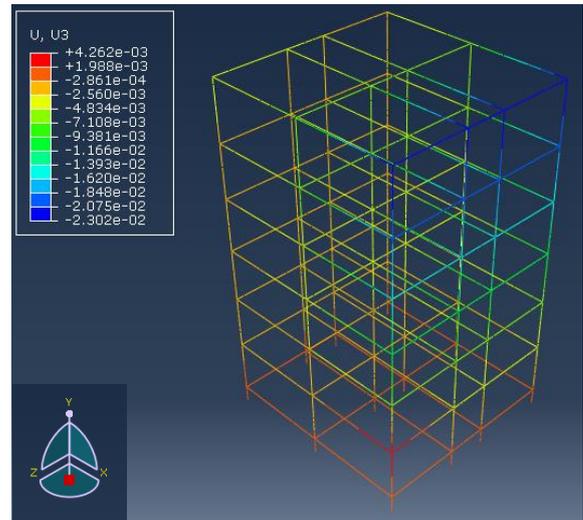


Figura B.6 Deslocamento segundo Z global  
(Abaqus)

### C – Diagramas de esforços e deslocamentos no final do incêndio no módulo 2

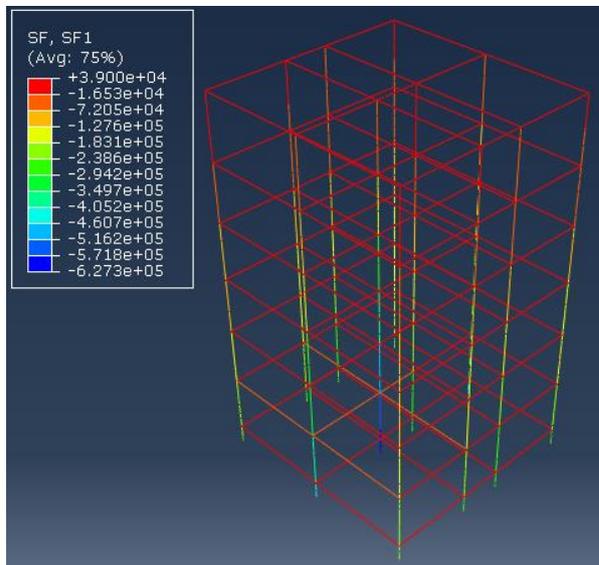


Figura C.1 Esforço axial (Abaqus)

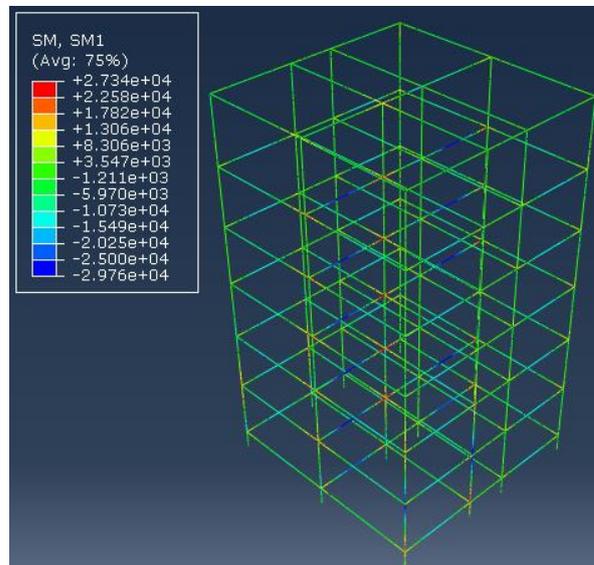


Figura C.2 Momento fletor em torno de X local (Abaqus)

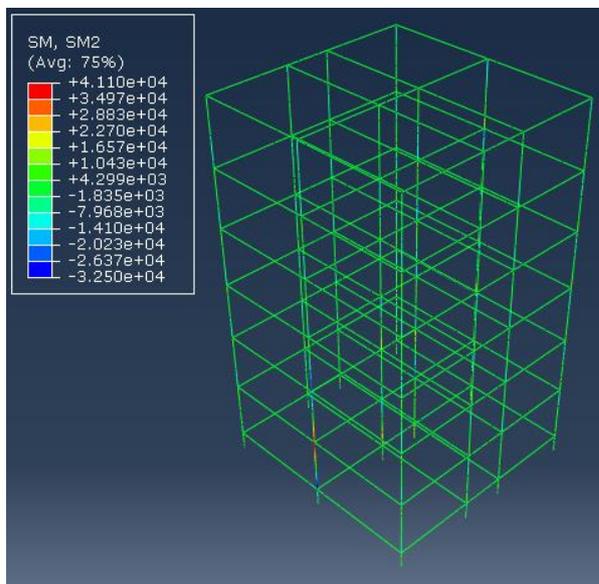


Figura C.3 Momento fletor em torno de Y local (Abaqus)

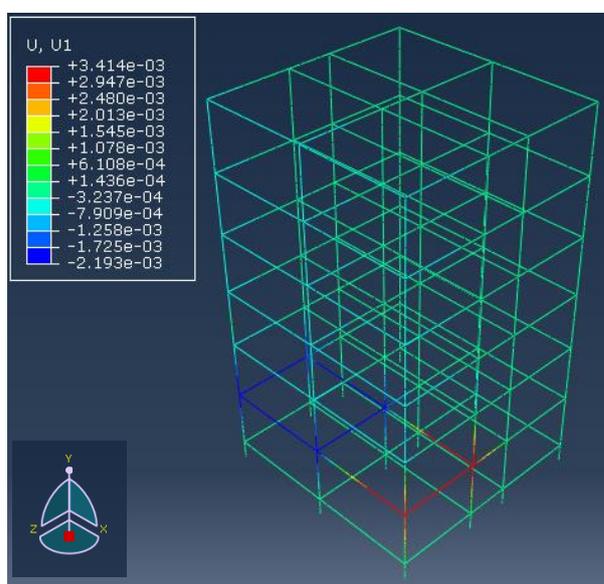


Figura C.4 Deslocamento segundo X global (abaqus)

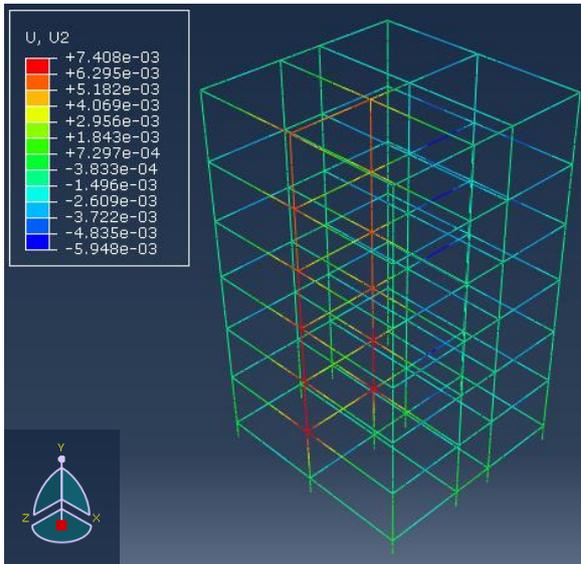


Figura C.5 Deslocamento segundo Y global  
(Abaqus)

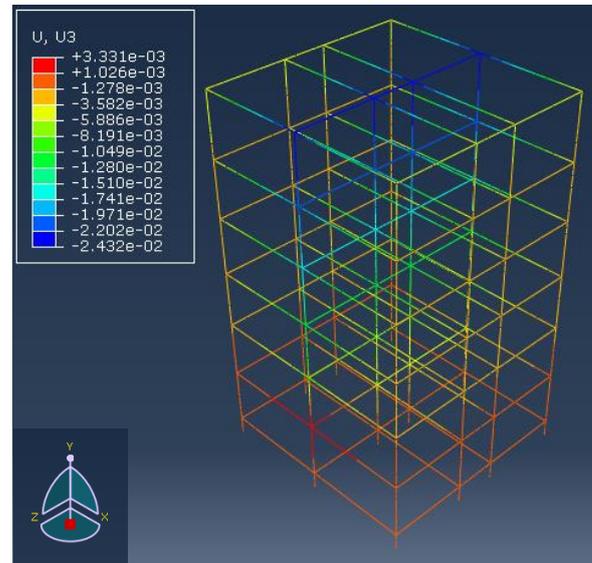


Figura C.6 Deslocamento segundo Z global  
(Abaqus)