

MÉTODOS SIMPLIFICADOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO – AVALIAÇÃO NUMÉRICA COM O MODELO SIFIRE

DIOGO ANDRÉ MIRANDA ALVES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS

Orientador: Professor Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves

JANEIRO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por,

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão,

O essencial na vida não é convencer ninguém, nem talvez isso seja possível...

Agostinho da Silva

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Miguel Chichorro Gonçalves, pelo tema proposto, pela disponibilidade oferecida, pela confiança depositada em mim e por ter criado todas as condições para a realização do trabalho.

À Engenheira Alzira Ramalho pelo projeto de estudo, por todos os documentos que facultou bem como pelo tempo que disponibilizou.

E a todos os meus Amigos que me apoiaram, incentivaram e ajudaram durante o tempo de realização deste trabalho o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A ação do fogo nos elementos estruturais, a qual provoca um aumento significativo da temperatura, leva a uma alteração no comportamento das estruturas (devido sobretudo à degradação dos materiais), incorrendo muitas vezes em deformações excessivas e por vezes ao colapso. Assim é necessário que estas obedeçam a critérios de resistência preconizados pela regulamentação existente.

A avaliação estrutural dos elementos de betão armado quando expostos a incêndio pode ser feita através de diferentes métodos presentes no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]: os Métodos Tabelados, Métodos Simplificados (da Isotérmica dos 500°C e das Zonas) e Métodos avançados de cálculo. Daqueles métodos, o trabalho visa dar ênfase especial aos métodos simplificados (o método da Isotérmica dos 500°C e o método das Zonas) referidos no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], e ainda a um método simplificado desenvolvido por Gonçalves, [4], o método SimFIRb que tira partido duma discretização maior das secções das vigas. Complementarmente, sobretudo porque na utilização dos métodos simplificados do Eurocódigo tirou-se partido de uma aplicação numérica, o SiFiRe, desenvolvida por Guimarães, [8], e Gonçalves, [4], também se faz uma abordagem da verificação estrutural ao fogo através do método das tabelas.

Assim, este trabalho tem como principal objetivo a aplicação numérica dos métodos das Tabelas e Simplificados de cálculo através do recurso ao programa de cálculo automático SiFiRe.

Na parte final do trabalho é realizada uma análise da resistência ao fogo de um edifício verificando a capacidade resistente das vigas de betão armado que o compõem quando sujeitas a incêndio.

PALAVRAS CHAVE: Betão armado, resistência ao fogo, método das tabelas, métodos simplificados, SiFiRe, viga.

ABSTRACT

The action of fire on structural elements, which causes a significant increase in their temperature, leads to a change in behavior of the structures (mainly due to thermal expansion), often incurring on excessive deformations and sometimes on collapse. Thus it is necessary that they verify a minimal resistance imposed by existing standards. The evaluation of reinforced concrete elements when exposed to fire can be done through different methods present in Eurocode 2, Part 1-2, [1]: Tabulated Data, Simplified methods (500 ° C Isotherm and Zone method) and advanced methods for verifying standard fire resistance. During this thesis aims to give a special emphasis to the simplified methods (500°C Isotherm and Zone method) listed in Eurocode 2, part 1-2, [1].

In addition, especially because in the use of simplified methods of Eurocode we used a numerical application, the SiFiRe model, developed by Guimarães, [8], and Gonçalves, [4], it is also a structural approach to check the fire resistance through the tabulated data method.

This work has as main objective the application of numerical methods, Tabulated and Simplified methods, by using the SiFiRe program for automatic calculation.

At the end of this work is performed a simplified analysis of a building, checking the bearing capacity of their reinforced concrete beams when expose to fire.

KEY WORDS: Concrete, fire resistance, tabulated method, simplified methods, SiFiRe, beam.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS	2
2 AÇÃO DO FOGO, REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA E EUROCÓDIGO	3
2.1. AÇÃO DO FOGO	3
2.1.1. INTRODUÇÃO	3
2.1.2. INCÊNDIO	3
2.1.3. PROPAGAÇÃO DO CALOR	4
2.1.3.1. Introdução	4
2.1.3.2. Condução	5
2.1.3.3. Convecção	6
2.1.3.4. Radiação	6
2.1.4. MODELAÇÃO DO INCÊNDIO	7
2.1.4.1. Introdução	7
2.1.4.2. Curvas Nominais	7
2.1.4.3. Curvas Paramétricas	8
2.2. REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA	9
2.3. EUROCÓDIGO	12
3 ESTADO DA ARTE – MÉTODOS SIMPLIFICADOS DO EUROCÓDIGO/ MODELO SiFire	15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. AÇÕES E CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E MECÂNICAS DO BETÃO E DO AÇO A ALTAS TEMPERATURAS	16
3.2.1. INTRODUÇÃO	16
3.2.2. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	17
3.2.3. BETÃO	19
3.2.4. AÇO	21
3.3. MÉTODOS DOS VALORES TABELADOS	23
3.3.1. VIGAS	26
3.3.1.1. Introdução	26

3.3.1.2. Vigas simplesmente apoiadas	26
3.3.1.3. Vigas contínuas.....	27
3.3.1.4. Vigas expostas nas quatro faces	29
3.4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO	30
3.4.1. INTRODUÇÃO.....	30
3.4.2. MÉTODO DA ISOTÉRMICA DOS 500°C	30
3.4.3. MÉTODO DAS ZONAS	31
3.4.4. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO.....	33
3.4.4.1. Procedimento de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado exposta ao esforço axial e ao momento fletor.....	33
3.4.4.2. Extensão no aço	35
3.4.4.3. Posicionamento das armaduras.....	35
3.5. MODELO SIFIRE.....	36
3.5.1. INTRODUÇÃO.....	36
3.5.2. SIFIRE	37
3.5.2.1. Desenvolvimento do programa.....	37
3.5.2.2. Estrutura geral e funcionalidades.....	38
4 ESTUDO DE CASO/ APRESENTAÇÃO DO PROJETO	43
4.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO.....	43
4.2. MATERIAIS	455
4.3. AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES.....	45
4.4. CONCEÇÃO ESTRUTURAL	46
4.5. VERIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO SEGUNDO OS REGULAMENTOS NACIONAIS RT-SCIE E RJ-SCIE - CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DOS CORPOS DO EDIFÍCIO	47
4.5.1. INTRODUÇÃO.....	47
4.5.2. LABORATÓRIOS	47
4.5.2.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo	48
4.5.2.2. Análise do efetivo	48
4.5.2.3. Cálculo da densidade de carga modificada.....	49
4.5.2.4. Definição da categoria de risco.....	50
4.5.2.5. Conclusões	51
4.5.3. TORRE	51
4.5.3.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo	51
4.5.3.2. Análise do efetivo	52
4.5.3.3. Cálculo da densidade de carga modificada.....	53
4.5.3.4. Definição da categoria de risco.....	53
4.5.3.5. Conclusões	54
4.5.4. NAVE	54
4.5.4.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo	55
4.5.4.2. Cálculo da densidade de carga modificada.....	55

4.5.4.3. Definição da Categoria de risco	55
4.5.4.4. Conclusões	55
4.5.5. CONCLUSÕES GERAIS	55
4.6. DESCRIÇÃO DAS VIGAS A SEREM AVALIADAS NO CAPÍTULO 6.....	56
4.6.1. APRESENTAÇÃO DAS VIGAS.....	56
4.6.1.1. Viga VF1.1 - Laboratórios.....	56
4.6.1.2. Viga VC5.1 - Nave.....	58
4.6.1.3. Viga V1A.8 - Torre.....	59
5 APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO SiFire NA	
AVALIAÇÃO DAS VIGAS DE UM PROJECTO	61
5.1. INTRODUÇÃO	61
5.2. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS VF1.1, V5C.1 E V1A.8	61
5.2.1. INTRODUÇÃO	61
5.2.2. CÁLCULO DE TEMPERATURAS E COEFICIENTES REDUTORES.....	62
5.2.2.1. Cálculo dos coeficientes redutores para a armadura inferior	63
5.2.2.2. Cálculo dos coeficientes redutores para secção de betão	64
5.2.3. CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA VIGA PELOS MÉTODOS TABELADOS E SIMPLIFICADOS, DA ISOTÉRMICA DOS 500°C E DAS ZONAS.	66
5.2.3.1. Viga VF1.1	66
5.2.3.2. Viga VC5.1.....	69
5.2.3.3. Viga V1A.8.....	72
5.3. CONCLUSÕES.....	75
6 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO	
.....	79
6.1. CONCLUSÕES GERAIS	79
6.2. TRABALHO FUTURO	80
BIBLIOGRAFIA.....	81
ANEXOS.....	83
A. PERFIS DE TEMPERATURA DO EUROCÓDIGO 2, PARTE 1-2	85
B. QUADROS DE TEMPERATURAS PARA ESTUDO DAS VIGAS DO EDIFÍCIO	89
C. RESULTADOS DO CÁLCULO DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO EM ESTUDO	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Curva de Incêndio Natural; a) fase de ignição; b) fase de propagação; c) fase de desenvolvimento pleno; d) fase arrefecimento ou extinção, [2].	4
Fig. 2.2 - a) Convecção; b) Radiação; c) Condução, [2].	5
Fig. 2.3 - Curvas nominais de incêndio, [3].	7
Fig. 2.4 - Representação da Curva natural e da Curva padrão nominal, [4].	8
Fig. 2.5 - Exemplos de curvas paramétricas [5].	9
Fig. 2.6 - Esquematização dos modelos de cálculo, [2].	14
Fig. 3.1 - Relação entre σ_{fi} e h (ou b) para o risco de “Spalling”, [4].	16
Fig. 3.2 - Variação de η_{fi} , função de $\xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k}$, para diferentes valores de $\psi_{1,1}$.	19
Fig. 3.3 - Coeficientes $k_c(\theta)$ e $k_{cT}(\theta)$ do betão com inertes siliciosos e calcários e betões de alta resistência para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.3, [4].	21
Fig. 3.4 - Coeficientes $k_s(\theta)$ do aço de Classe X para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].	22
Fig. 3.5 - Coeficientes $f_{sp,\theta} / f_{yk}$ e $E_{s,\theta} / E_s$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].	23
Fig. 3.6 - Definição das variáveis geométricas usadas nos quadros seguintes.	24
Fig. 3.7 - Curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado e de pré-esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, [1].	25
Fig. 3.8 - Envolvente dos momentos fletores resistentes em situação de incêndio.	28
Fig. 3.9 - Isotérmica dos 500°C e secção reduzida. Exposição ao fogo em três lados: a) Zona em tração exposta; b) Zona em compressão exposta; c) Exposição nos quatro lados, [4].	31
Fig. 3.10 - Definição da variável a_z e W – Redução da resistência e da secção para peças sujeitas a incêndio: a) Parede; b) Parede espessa; c) Pilar; d) Extremo da parede; e) Viga; f) Laje; g) “Parede equivalente”, divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo de redução da resistência e a_z , [4].	32
Fig. 3.11 - Distribuição de tensões e extensões no estado limite último para uma secção retangular de betão armado reduzida com armadura de tração e compressão.	34
Fig. 3.12 - Cálculo da distância entre o centro das armaduras e a face sujeita a incêndio, a.	36
Fig. 3.13 - Organigrama representativo dos Métodos e sub-métodos de cálculo, [8].	38
Fig. 3.14 - Menu principal do Programa SiFiRe.	39
Fig. 3.15 - Menu do método das Tabelas com saída de resultados (SiFiRe).	40
Fig. 3.16 – Menu método da Isotérmica dos 500°C – introdução de dados e saída de resultados (SiFiRe).	40

Fig. 3.17 - Exemplo de armaduras para Vigas, a) dois níveis; b) um nível.	41
Fig. 3.18 - Menu método das Zonas – introdução de dados e saída de resultados (SiFiRe).....	42
Fig. 4.1 - Planta do edifício.....	44
Fig. 4.2 - Esquema 3D do edifício.	44
Fig. 4.3 - Planta estrutural piso 1 do edifício Laboratórios.....	56
Fig. 4.4 - Secção transversal da viga VF1.1.	57
Fig. 4.5 - Planta estrutural piso 1 do edifício Nave.....	58
Fig. 4.6 - Secção transversal da viga VC52.1.	59
Fig. 4.7 - Planta estrutural piso 1 do edifício Torre.....	59
Fig. 4.8 - Secção transversal da viga V1A.8.	60
Fig. 5.1 - Perfil de temperatura (°C) para uma viga, hxb = 600 x 300, R90, com representação da secção e varões da armadura inferior da viga VF1.1.	63
Fig. 5.2 - Curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado e de pré- esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, K_s , [1], com representação da leitura desses coeficientes correspondentes, para o caso da viga VF1.1.	64
Fig. 5.3 - Perfil de temperatura (°C) para uma viga, hxb = 600 x 300, R90, com representação da secção da viga VF1.1 e divisão em 3 zonas (Método das Zonas).	65
Fig. 5.4 - Coeficiente, K_C (Θ), de redução do valor característico da resistência (f_{ck}) do betão com representação da leitura desses coeficientes correspondentes, para o caso da viga VF1.1.	65
Fig. 5.5 - Método das Tabelas (viga VF1.1) (SiFiRe).	67
Fig. 5.6 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VF1.1) – introdução de dados (SiFiRe).	67
Fig. 5.7 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VF1.1) – resultados (SiFiRe).	68
Fig. 5.8 - Método das Zonas – introdução de dados (viga VF1.1) (SiFiRe).....	68
Fig. 5.9 Método das Zonas (viga VF1.1) – resultados (SiFiRe).	69
Fig. 5.10 - Método das Tabelas (viga VC5.1) (SiFiRe).	70
Fig. 5.11 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VC5.1) – introdução de dados (SiFiRe).....	71
Fig. 5.12 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VC5.1) – resultados (SiFiRe).	71
Fig. 5.13 - Método das Zonas (viga VC5.1) – introdução de dados (SiFiRe).	72
Fig. 5.14 - Método das Zonas (viga VC5.1) – resultados (SiFiRe).....	72
Fig. 5.15 - Método das Tabelas (viga V1A.8) (SiFiRe).	73
Fig. 5.16 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga V1A.8) – introdução de dados (SiFiRe).....	74
Fig. 5.17 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga V1A.8) – resultados (SiFiRe).	74
Fig. 5.18 - Método das Zonas (viga V1A.8) – introdução de dados (SiFiRe).	75

Fig. 5.19 - Método das Zonas (viga V1A.8) – resultados (SiFiRe).....	75
Fig. 5.20 - Planta do edifício Nave com evidência das vigas que não verificaram a resistência ao fogo requerida.	76
Fig. 5.21 - Planta do edifício Torre com evidência das vigas que não verificaram a resistência ao fogo requerida.	76
Fig. A.1 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 150 \times 80$ – R 30.....	85
Fig. A.2 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$	86
Fig. A.3 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$ – R90 e Isotérmica de 500°C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$. ..	86
Fig. A.4 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$..	87
Fig. A.5 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$ – R 120.....	87
Fig. A.6 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$..	88
Fig. A.7 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$..	88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Fatores de classificação do risco em função da utilização tipo. I) Habitacional; II) Estacionamento; III) Administrativo; IV) Escolares; V) Hospitalares e lares de idosos; VI) Espetáculos; VII) Desportivos; VIII) Hoteleiros; IX) Comerciais; X) Museus; XI) Bibliotecas; XII) Industriais, [8].	10
Quadro 2.2 - Categorias de risco para Utilização tipo “Habitacional”, [7].	11
Quadro 2.3 - Categorias de risco para Utilização tipo “Administrativo”, [7].	11
Quadro 2.4 - Categorias de risco para Utilização tipo “Industrial”, [7].	11
Quadro 2.5 - Resistências Mínimas para cada Utilização-tipo em função da categoria de risco, [8].	12
Quadro 3.1 - Coeficientes de combinação, [9].	18
Quadro 3.2 - Efeitos da temperatura nos constituintes do Betão, [8].	19
Quadro 3.3 - Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de betões correntes siliciosos e calcários sujeitos a elevadas temperaturas.	20
Quadro 3.4 - Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de aços correntes de Classe N sujeitos a elevadas temperaturas.	22
Quadro 3.5 - Dimensões mínimas da alma de vigas simplesmente apoiadas e da distância ao eixo dos varões para vigas de betão armado ou pré-esforçado [1].	27
Quadro 3.6 - Dimensões mínimas da largura da viga e da distância ao eixo dos varões para vigas contínuas de betão armado ou pré-esforçado, [1].	29
Quadro 3.7 - Larguras mínimas da viga e da alma para vigas em “I” de betão armado ou pré-esforçado [1].	29
Quadro 3.8 - Largura mínima da secção em função da resistência ao fogo e da densidade de carga de incêndio, para o incêndio padrão e curvas paramétricas, respetivamente.	31
Quadro 4.1 - Áreas Brutas de projeto.	45
Quadro 4.2 - Ações a considerar nos 3 corpos do edifício.	45
Quadro 4.3 - Categoria de risco para Utilização tipo IV segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro IV, [6].	50
Quadro 4.4 - Categoria de risco para Utilização tipo III segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro III, [6].	50
Quadro 4.5 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].	500
Quadro 4.6 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, Quadro IX, [7].	51
Quadro 4.7 - Categoria de risco para Utilização tipo III segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro III, [6].	53

Quadro 4.8 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].	54
Quadro 4.9 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, [7].	54
Quadro 4.10 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].	55
Quadro 4.11 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, Quadro IX, [7].	55
Quadro 4.12 - Utilizações Tipo (UT), Categorias de risco e classe de Resistência ao Fogo.	55
Quadro 4.13 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga VF1.1.	57
Quadro 4.14 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga V5C.1.	58
Quadro 4.15 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga V1A.8.	60
Quadro 5.1 - Parâmetros geométricos das secções das vigas analisadas com os métodos Tabelado, da Isotérmica dos 500°C e das Zonas (SiFiRe) e propriedades materiais (dimensões da secção de betão em [m] e diâmetros dos varões em [mm]).	62
Quadro 5.2 – Temperaturas e coeficientes redutores para a armadura inferior da secção da viga VF1.1.	64
Quadro 5.3 - Temperaturas médias e coeficientes redutores das secções de betão.	66
Quadro 5.4 - Resultados do Método das tabelas.	66
Quadro 5.5 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).	66
Quadro 5.6 - Resultados do Método Tabelado.	69
Quadro 5.7 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).	70
Quadro 5.8 - Resultados do Método Tabelado	73
Quadro 5.9 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).	73
Quadro B - Temperaturas das secções das vigas do edifício	89
Quadro C - Resultados das secções das vigas do edifício	91

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	Distância do eixo das armaduras longitudinais à face [m]
a_{500}	Espessura degradada de betão obtida pelo Método das Zonas [m]
a_z	Espessura degradada de betão obtida pelo Método da isotérmica de 500°C[m]
A_c	Área de secção de betão
A_d	Valor de cálculo da ação accidental
A_s	Área de aço. Área de armadura de tração. Área total de armadura
A'_s	Área de aço. Área de armadura em compressão
$A_{s,req}$	Área de aço requerida para o estado limite ultimo de acordo com o Eurocódigo 2, parte 1-1, [7]
$A_{s,prov}$	Área de aço utilizada
b	Menor dimensão da secção do elemento. Largura original da peça [m]
b_{fi}	Largura efetiva da secção reduzida [m]
b_{min}	Menor dimensão do pilar [m]
d	Altura efetiva. Espessura da parede [m]
d_{fi}	Altura efetiva da secção reduzida [m]
e	Excentricidade [m]
e'	Excentricidade fictícia [m]
E	Módulo de elasticidade [GPa]
E_d	Efeito das ações a partir da combinação fundamental à temperatura ambiente
$E_{d,fi}$	Efeito das ações a partir da combinação fundamental em incêndio
$E_{fi,d,t}$	Valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio no instante t
E_s	Módulo de elasticidade do aço [GPa]
$E_{s,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço para determinada temperatura [GPa]
$f_{ck}, f_{ck,20^\circ C}$	Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]
f_{cd}	Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão [MPa]
$f_{c,\theta}, f_{ck,\theta}$	Tensão máxima de compressão do betão em função da temperatura [MPa]
$f_{cd,\theta}$	Tensão de cálculo máxima de compressão do betão em função da temperatura [MPa]
f_{ck}	Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade [MPa]

f_{sp}	Tensão limite de proporcionalidade do aço [MPa]
$f_{sp,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço em função da temperatura [MPa]
f_{sd}	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço à temperatura ambiente [MPa]
$f_{sd,\theta}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio [MPa]
$f_{sd,fi,\theta m}$	Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio à temperatura média do nível de armadura [MPa]
f_{sy}	Tensão de cedência à tração do aço à temperatura ambiente [MPa]
$f_{sy,\theta}$	Tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio [MPa]
f_{yk}	Tensão característica de cedência do aço à temperatura ambiente [MPa]
F_s	Força de tração/compressão aplicada para nível de armadura inferior [KN]
F'_s	Força de tração/compressão aplicada para nível de armadura superior [KN]
G_k	Valor característico das ações permanentes [KN]
h	Altura da secção [m]
h_c	Densidade de fluxo de calor no interior do corpo [W/m ²]
$h_{net,c}$	Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido a convecção [W/m ²]
$h_{net,d}$	Fluxo de calor [W/m ²]
$h_{net,r}$	Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido a radiação [W/m ²]
i	Raio de giração
k	Coeficiente de transmissão térmica. Condutibilidade térmica [W/m°C]
k_1	Fator que depende da classe de resistência do betão
k_2	Fator que depende da carga axial e esbelteza
$k_{c,m}$	Fator de redução das características médias do betão
$k_c(\theta_i)$	Fator de redução das características médias do betão em cada zona
$k_c(\theta_i)$	Fator de redução das características médias do betão no ponto médio M
$k_c(\theta)$	Coeficiente de redução da tensão de compressão do betão
$k_{cT}(\theta)$	Coeficiente de redução da tensão de Tração do betão
$k_{(\theta)}$	Fator de redução da tensão dependente da temperatura do material
l	Comprimento dos elementos [m]
l_0, l_{eff}	Comprimento efetivo do pilar à temperatura ambiente [m]
$l_{0,fi}$	Comprimento efetivo do pilar sujeito a incêndio [m]
l_{inf}	Largura de influencia [m]

$M_{0Ed,fi}$ e $N_{0Ed,fi}$	Valores de cálculo do momento de primeira ordem e carga axial em situação de incêndio [KN.m , KN]
M_{Ed} e N_{Ed}	Valores de cálculo do momento e carga axial à temperatura ambiente [KN.m ,KN]
$M_{Rd,fi}$ e $N_{Rd,fi}$	Momento fletor resistente e esforço axial resistente em situação de incêndio [KN.m ,KN]
M_{Rd} e N_{Rd}	Momento fletor resistente e esforço axial resistente à temperatura ambiente [KN.m ,KN]
n	Nível de carregamento. Número de varões da armadura de cada nível
N_{sd}	Valor de cálculo do esforço axial atuante à temperatura ambiente [KN]
$N_{sd,fi}$	Valor de cálculo do esforço axial atuante em situação de incêndio [KN]
p_{sd}	Valor da carga distribuída
$Q_{k,1}$	Valor característico da ação variável principal [KN]
$Q_{k,i}$	Valor característico das restantes ações variáveis [KN]
$R_{fi,d,t}$	Valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t
$V_{Rd,max}$	Valor de cálculo do esforço transversal máximo [KN]
V_{Ed}	Valor de cálculo do esforço transversal aplicado à temperatura ambiente [KN]
t	Instante de tempo
x	Coordenada de posição. Profundidade do eixo neutro [m]
$X_{d,fi}$	Valor de cálculo das propriedades térmicas ou mecânicas
$X_{k(\theta)}$	Valor característico da propriedade em situação de incêndio, função da temperatura θ
X_k	Valor característico da propriedade à temperatura ambiente
y	Coordenada de posição [m]
z	Braço do momento relativo à zona em compressão de betão e tração das armaduras [m]
z'	Braço do momento relativo das armaduras [m]
α	Coeficiente de dilatação térmica
α_c	Coeficiente de transmissão de calor por convecção [W/m ² K]
α_{cc}	Coeficiente de resistência à compressão do betão tendo em conta os efeitos a longo prazo
β	Coeficiente dependente do esforço normal reduzido, ν
ε	Extensão [m]
ε_c	Extensão do betão [m]

ε_{cu}	Extensão limite última do betão [m]
ε_f	Emissividade do compartimento de incêndio
ε_m	Emissividade da superfície do elemento
ε_s	Extensão do aço [m]
ϕ, ϕ_{arm}	Diâmetro das armaduras [mm]
ϕ_{estrib}	Diâmetro dos estribos [mm]
γ_{GA}	Coefficiente de segurança parcial para as ações permanentes em situação de incêndio
γ_s	Fator parcial de segurança do aço
γ_c	Fator parcial de segurança do betão
$\gamma_{M,fi}$	Fator parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio
λ	Esbelteza à temperatura ambiente
λ_{fi}	Esbelteza em situação de incêndio
η, ν	Nível de carregamento
η_{fi}	Nível de carregamento para situação e incêndio
$\psi_i, \psi_{1,1}, \psi_{2,i}, \psi_{fi}$	Coefficiente de combinação de acordo com o Eurocódigo
θ	Temperatura [°C]
θ_g, θ_r	Temperatura na vizinhança do elemento [°C]
θ_m	Temperatura na superfície do elemento [°C]
θ_{cr}	Temperatura crítica das armaduras [°C]
σ	Tensão de compressão. Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴]
σ_{fi}	Tensão de compressão em situação de incêndio [MPa]
σ_{fi}	Tensão de compressão em situação de incêndio [MPa]
σ_s	Tensão de cedência do aço [MPa]
$\sigma_{s,fi}$	Tensão de cedência do aço em situação de incêndio [MPa]
$\sigma_{s,e}$	Tensão de cedência do aço para uma determinada extensão [MPa]
ω	Relação mecânica de armadura à temperatura ambiente
Φ	Fator de configuração
δ	Redistribuição dos momentos feita no dimensionamento à temperatura ambiente

EC	Eurocódigo
EN	“Norme Européenne”
DNA	Documento Nacional de Aplicação
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios
RJ-SCIE	Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios
RSAEEP	Regulamento de Segurança e Ações de Estruturas de Edifícios e Pontes
RSCIE	Regulamento de Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SCIE	Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SiFiRe	“Simplified Fire Resistance”, Modelo informático
SimFirb	“Simplified Fire Resistance beam”, Modelo informático
SimFirc	“Simplified Fire Resistance column”, Modelo informático

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

No passado as preocupações dos projetistas com a influência da temperatura nas estruturas sujeitas a incêndio prendiam-se quase exclusivamente na área de sistemas ativos e passivos de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE). Historicamente, em Portugal, a primeira regulamentação sobre o assunto aparece na década de 80, pelo facto de, até essa data, não existirem conhecimentos suficientes sobre o comportamento ao fogo dos materiais e dos elementos de construção não estando, portanto, suscetíveis de verificação objetiva. É então a partir dessa década que se assiste a uma maior preocupação com o fenómeno de incêndio incluindo a sua consideração no dimensionamento de estruturas de betão armado.

O betão é um material que apresenta uma boa resistência quando sujeito a elevadas temperaturas pelo que é opção em detrimento de outros materiais utilizados na construção. As elevadas temperaturas a que estes materiais e a própria estrutura estão sujeitos na ocorrência de um incêndio, dão lugar a diversas transformações que podem afetar gravemente as suas características mecânicas e a sua distribuição global de esforços. A ação do fogo consiste, de uma forma simplificada, numa variação de temperatura dos elementos que a constituem. Deste facto resulta a ocorrência de dilatações térmicas (podendo provocar esforços consideráveis em estruturas hiperestáticas) e a alteração das propriedades dos materiais constituintes desses elementos. Assim tem-se assistido ao desenvolvimento de modelos numéricos que traduzem a resposta térmica e/ ou mecânica em situação de incêndio. Contudo a atual regulamentação em vigor, permite analisar a segurança de uma estrutura contra incêndio, elemento a elemento, não tendo em conta a interação entre eles.

Ao longo deste trabalho o objetivo passa por avaliar o comportamento e a resistência de estruturas de betão armado em situação de incêndio, utilizando para tal o método das tabelas e os métodos simplificados (método da Isotérmica dos 500°C e método das Zonas) de verificação da segurança presentes no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], bem como o recurso ao modelo SiFiRe. Assim, antes da aplicação dos referidos métodos procedeu-se à validação e compreensão de alguns dos perfis de temperaturas fornecidos no Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], e a análise dos modelos a utilizar referidos anteriormente.

Refira-se que a utilização do método das tabelas deveu-se a uma abordagem inicial a fazer a todos os elementos estruturais avaliados e por estar disponível no modelo informático SiFiRe.

Na fase final do trabalho utiliza-se o modelo SiFiRe na avaliação da resistência ao fogo das vigas de uma estrutura real à luz dos métodos contemplados no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1] (método das Tabelas, método da Isotérmica dos 500°C e método das Zonas).

1.2. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, o primeiro dos quais é constituído pela presente introdução, Capítulo 1, onde se procura enquadrar o tema a desenvolver bem como traçar os principais objetivos a alcançar.

No Capítulo 2 procura-se fazer uma caracterização da ação do fogo e uma apresentação da regulamentação de segurança contra incêndio e dos Eurocódigos, necessários para o dimensionamento de estruturas de betão armado.

No Capítulo 3 faz-se o estado de arte, onde é analisada a abordagem do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], e se faz uma apresentação dos métodos de análise das estruturas, relativo ao comportamento estrutural de elementos de betão sujeitos a incêndio.

No Capítulo 4 faz-se uma apresentação do edifício a estudar no Capítulo 5, onde se dá ênfase ao enquadramento e exigência a dar à resistência ao fogo pelos regulamentos nacionais de SCIE.

O Capítulo 5 é dedicado à aplicação do modelo SiFiRe na verificação das vigas daquele edifício em situação de incêndio.

No Capítulo 6 é apresentada uma síntese do trabalho realizado, onde se salientam as conclusões mais importantes. São ainda sugeridos desenvolvimentos futuros para continuidade do trabalho efetuado na presente dissertação.

Finalmente em Anexo são apresentados:

- Anexo A: Perfis de Temperatura do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1];
- Anexo B: Quadros de temperaturas das secções de betão armado das vigas do edifício em estudo (Capítulo 5);
- Anexo C: Quadros com os resultados dos cálculos das secções de betão armado das vigas do edifício em estudo (Capítulo 5).

2

AÇÃO DO FOGO, REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA E EUROCÓDIGO

2.1. AÇÃO DO FOGO

2.1.1. INTRODUÇÃO

O betão é largamente utilizado na indústria da construção tratando-se de um material versátil que pode ser moldado em quase todas as formas e projetado para resistir aos esforços estáticos e dinâmicos previstos, oferecendo assim a proteção desejada. Uma das maiores vantagens do betão em relação a outros materiais prende-se com o seu desempenho ao fogo. No entanto, no dimensionamento de estruturas de Betão armado, a consideração da ação do fogo é uma exigência fundamental, sendo o seu estudo de grande importância. O crescimento do poder económico associado à crescente valorização da vida humana faz com que haja uma maior exigência, por parte da sociedade, relativamente aos requisitos de segurança contra incêndio.

O incêndio sendo uma ação acidental não há forma de prever a sua ocorrência. Assim, as estruturas terão que ser calculadas de maneira a permitir a saída, em segurança, dos seus ocupantes em tempo útil, permitir o combate do incêndio por parte dos bombeiros, salvaguardar os bens existentes no edifício e das atividades a desenrolar no mesmo, a proteção da estrutura contra danos de incêndios que possam deflagrar nela ou em estruturas vizinhas e, se possível, evitar a ruína ou colapso da estrutura.

O fogo resulta de um processo termoquímico exotérmico de oxidação. Para que esta reação ocorra, é necessário que estejam reunidos os seguintes elementos:

- Combustível – Componente combustível, sendo normalmente um elemento orgânico;
- Comburente – Elemento capaz de oxidar o combustível, como o oxigénio;
- Fonte de ignição – Fonte de calor capaz de fornecer energia suficiente para iniciar a reação;
- Reação em cadeia – Permite a manutenção do fogo.

Depois de iniciada a reação, para que o fogo se desenvolva será necessário a existência de componentes combustíveis para o alimentar.

2.1.2. INCÊNDIO

O desenvolvimento de um incêndio é caracterizado por uma curva típica denominada curva de incêndio natural, onde se observam 4 fases: ignição, propagação, desenvolvimento pleno e arrefecimento ou extinção (Figura 2.1).

A fase de ignição ocorre quando existir uma fonte de energia capaz de ativar o material combustível, esta fonte de energia normalmente é causada de forma acidental como por exemplo curto-circuitos, pontas de cigarros, faíscas de uma operação de soldadura, ou máquinas que não estejam a operar corretamente. Esta fase é caracterizada por ser de evolução lenta e ocorrer a temperaturas médias na ordem dos 400°C.

Posterior à ignição, com a existência de oxigénio e em determinadas condições, irá ocorrer frequentemente uma inflamação generalizada que se denomina de *flashover*. Esta inflamação ocorre normalmente para temperaturas médias da ordem dos 450°C aos 600°C. Após o *flashover* assiste-se a um aumento rápido das temperaturas e denomina-se por fase de propagação.

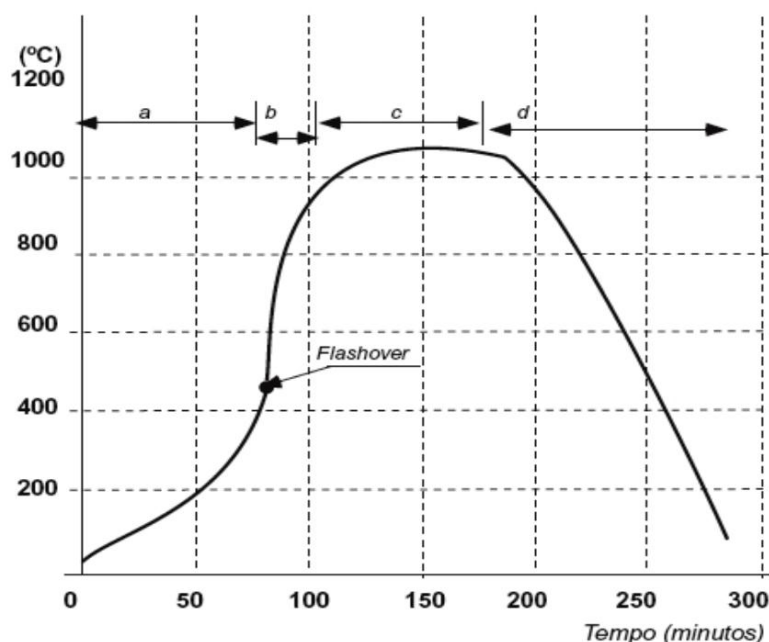


Fig. 2.1 - Curva de Incêndio Natural; a) fase de ignição; b) fase de propagação; c) fase de desenvolvimento pleno; d) fase arrefecimento ou extinção, [2].

Quando as temperaturas começam a estabilizar para valores na ordem dos 1000°C, diz-se que foi atingido o desenvolvimento pleno do incêndio. É nesta fase que se dá a combustão da maior parte dos materiais combustíveis, terminando na fase de arrefecimento ou extinção quando estes materiais começam a ser insuficientes ou existe intervenção de agentes externos que provocam uma diminuição progressiva da temperatura.

Quando durante o incêndio o comburente é suficiente a combustão depende apenas das características e quantidade do combustível, diz-se que o incêndio é controlado pela carga de incêndio. Por outro lado, quando a ventilação é insuficiente para a carga de incêndio disponível diz-se que o incêndio é controlado pela ventilação.

2.1.3. PROPAGAÇÃO DO CALOR

2.1.3.1. Introdução

O estudo da propagação do calor é bastante importante no estudo de um incêndio. A propagação é definida como sendo a transmissão de energia de um meio para outro meio (ou no mesmo meio)

sólido, líquido ou gasoso, sendo que este fluxo, quantidade de calor transmitida por unidade de área e por unidade de tempo, ocorre das temperaturas mais elevadas para as mais baixas.

Normalmente são considerados três processos de propagação do fogo, que são a condução, a convecção e a radiação, que podem coexistir (Figura 2.2).

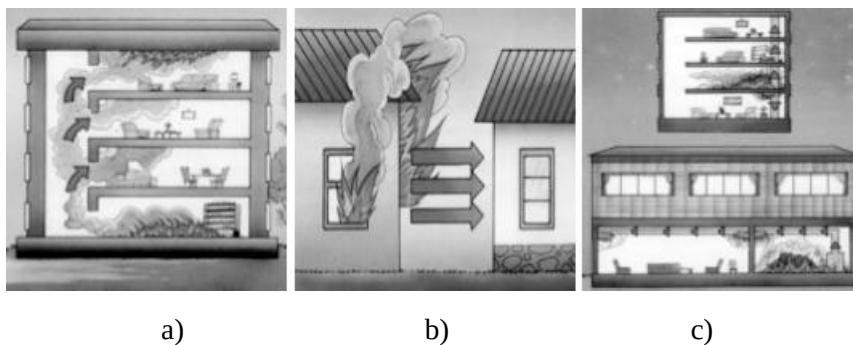


Fig. 2.2 - a) Convecção; b) Radiação; c) Condução, [2].

Segundo as disposições regulamentares, Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], o fluxo de calor de calor poderá ser calculado através da expressão:

$$h_{net,d} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Em que:

$h_{net,d}$ - Fluxo de calor $[W/m^2]$

$h_{net,c}$ - Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à convecção $[W/m^2]$

$h_{net,r}$ - Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à radiação $[W/m^2]$

2.1.3.2. Condução

A condução é o processo de propagação de calor no interior dos materiais por contato ou por aquecimento, das partes mais quentes para as partes mais frias, sem que haja transporte de material. Esta transferência de calor é mais notória quanto melhor condutor for o material (ex. metais). Este processo é regido pela Lei de Fourier, que estabelece que o fluxo de calor que atravessa uma dada superfície é proporcional ao produto da área atravessada pelo gradiente de temperaturas existente, ou seja:

$$h_c = -k \cdot \frac{d\theta(x)}{dx} \quad [W/m^2] \quad (2.2)$$

Em que:

h_c - Densidade de fluxo de calor no interior do corpo $[W/m^2]$

k - Coeficiente de condutibilidade térmica $[W/m^\circ C]$

θ - Temperatura no interior do elemento $[^\circ C]$

x - coordenada de posição $[m]$

2.1.3.3. Convecção

A transmissão de calor por convecção caracteriza-se pela transmissão de calor através do movimento de um fluido (líquido ou gasoso), quer no seu interior quer devido ao contacto com partes sólidas devido ao gradiente térmico.

A convecção pode ainda ser natural ou forçada dependendo da ação que lhe dá origem. Assim, teremos convecção natural quando o movimento é originado pela ação térmica do próprio fluido e convecção forçada quando o movimento do fluido se deve a uma ação mecânica externa (Ex.: ventilador, bomba, vento, etc.).

Estes dois tipos de convecção podem ocorrer simultaneamente na propagação de um incêndio e no interior de um compartimento. A lei matemática que traduz a convecção foi descoberta por Newton, relacionando a quantidade de calor transmitida entre a superfície e o fluido que o rodeia.

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (2.3)$$

Em que:

$h_{net,c}$	- Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à convecção	[W/m ²]
α_c	- Coeficiente de transmissão de calor por convecção	[W/m ² K]
θ_g	- Temperatura de gases na vizinhança do elemento	[°C]
θ_m	- Temperatura na superfície do elemento	[°C]

2.1.3.4. Radiação

A radiação, ao contrário das outras formas de transmissão de calor, não precisa de contacto direto entre materiais para que se crie um fluxo de energia. À transformação de calor em radiação dá-se o nome de emissão, e ao processo de transformação de radiação em calor chama-se absorção.

Os corpos sólidos emitem uma grande radiação ao contrário do que acontece com os gases quentes e a radiação da chama.

Para se descrever a radiação recorre-se à fórmula de Stefan-Boltzmann que é usada para se determinar o valor de radiação recebida pelo elemento.

$$h_{net,r} = \Phi \cdot \mathcal{E}_f \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (2.4)$$

Em que:

$h_{net,r}$	- Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento devido à radiação	[W/m ²]
Φ	- Fator de configuração e que segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], deve ser igual a 1,0	
$\mathcal{E}_f$	- Emissividade do comportamento de incêndio que segundo EC1, parte 1-2, deve ser igual a 1,0	
ε_m	- Emissividade da superfície do elemento	
σ	- Constante de Stefan-Boltzmann	[=5,67.10-8 W/m ² K ⁴]
θ_r	- Temperatura da radiação na vizinhança do elemento	[°C]
θ_m	- Temperatura na superfície do elemento	[°C]

2.1.4. MODELAÇÃO DO INCÊNDIO

2.1.4.1. Introdução

A modelação do incêndio consiste em obter uma curva representativa do comportamento de um incêndio ao longo do tempo. Estas curvas são de grande importância para o desenvolvimento dos métodos usados durante esta dissertação pois vão definir a evolução das temperaturas dos elementos estruturais em estudo. Contudo, devido à diversidade de situações de incêndio possíveis (dependentes de vários fatores), a definição de uma curva adequada (curva de incêndio natural Figura 2.1) para a verificação de segurança das estruturas em relação ao fogo torna-se bastante difícil dando-nos o Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], em vigor dois tipos de curvas:

- Curvas Nominais;
- Curvas Paramétricas.

2.1.4.2. Curvas Nominais

As Curvas Nominais são curvas que são independentes do tamanho do edifício e das características do compartimento. Estas curvas normalizadas foram determinadas resolvendo-se a equação do balanço de energia do compartimento. O Eurocódigo 1, parte 1-2, [3], define 3 curvas para 3 diferentes casos:

- Curva de Incêndio padrão ISO 834;

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (2.5)$$

- Curva de Incêndio para elementos exteriores;

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687 \cdot e^{-0,32t} - 0,313e^{3,8t}) \quad (2.6)$$

- Curva de Incêndio de Hidrocarbonetos.

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675e^{2,5t}) \quad (2.7)$$

Em que:

θ_g - Temperatura de incêndio num compartimento com incêndio
 t - Tempo

[°C]
 [min]

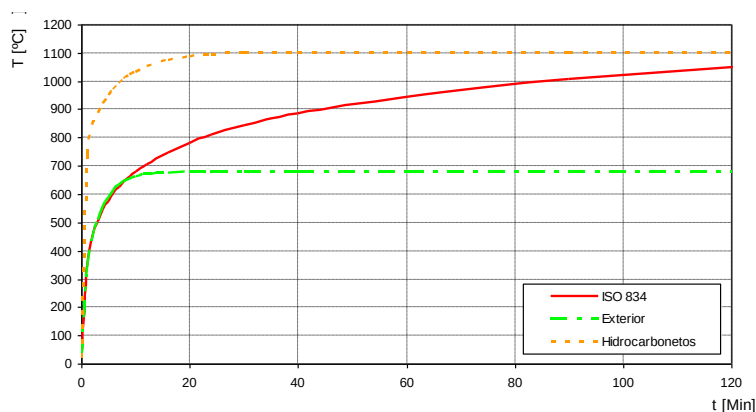


Fig. 2.3 - Curvas nominais de incêndio, [3].

Como se pode ver na Figura 2.3 as 3 curvas são distintas entre si e da curva de incêndio natural (Figura 2.1), não apresentando fases de ignição e extinção ou arrefecimento.

A curva de incêndio de elementos exteriores tem a vantagem de não colocar a estrutura em contacto direto com o incêndio, o que faz com que seja menos severa no valor máximo de temperatura atingida.

A curva dos Hidrocarbonetos tem um crescimento da temperatura muito mais acelerado, atingindo o valor máximo de temperatura muito mais rapidamente que as outras duas.

A curva ISO 834 é a que é mais vezes usada para cálculo de estruturas edificadas, representando um incêndio num edifício onde o tipo de carga de incêndio inclui a madeira, os tecidos, o papel, entre outros. Esta curva também é caracterizada por ter um crescimento infinito.

Comparando as curvas nominais com a curva de incêndio natural, Figura 2.4, chega-se à conclusão que por estas não terem fase de arrefecimento e extinção, poderá levar a grandes erros no estudo de estruturas, uma vez que nesta fase existem retrações e perdas de ductilidade que podem provocar roturas. Não obstante, neste tipo de risco (de incêndio) as curvas são de grande importância para definir o conceito de *fogo regulamentar* no estudo da ação do fogo.

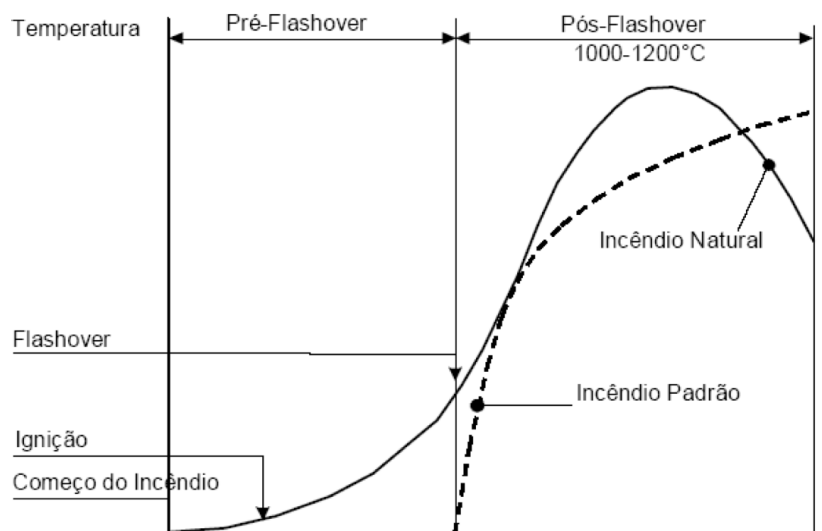


Fig. 2.4 - Representação da Curva natural e da Curva padrão nominal, [4].

2.1.4.3. Curvas Paramétricas

As curvas de incêndio Paramétricas são curvas mais realistas que as nominais pois têm em conta os fatores: densidade de carga de incêndio, condições de arejamento, e dos materiais constituintes das paredes envolventes do compartimento além de terem fase de arrefecimento e extinção.

As curvas paramétricas são também descritas no Eurocódigo 1, parte 1-2, Anexo A, [3], e apresentam variações em função dos fatores utilizados. Quando se aumenta o fator de ventilação, o incêndio irá tornar-se mais curto mas com temperaturas mais elevadas, aumentando-se a carga de incêndio verifica-se igualmente um aumento do incêndio.

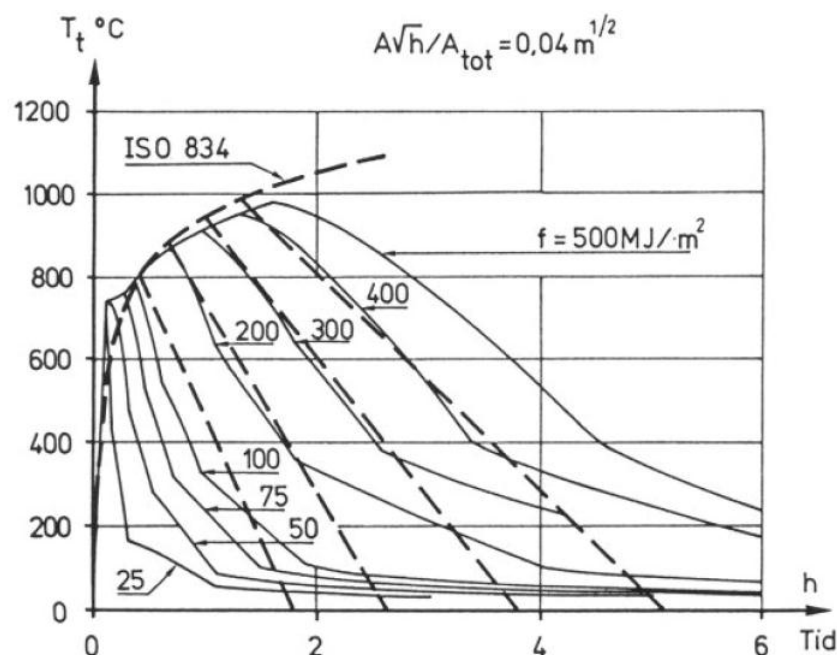


Fig. 2.5 - Exemplos de curvas paramétricas [5].

Estas curvas aproximam-se melhor da realidade pois entram em consideração com as propriedades do edifício e incluem a fase de arrefecimento.

2.2. REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA

Um importante incremento na regulamentação contra incêndios em Portugal foi dado após o grande Incêndio dos Armazéns do Chiado na Baixa de Lisboa, em 1988. Recentemente, devido à necessidade de atualizar os regulamentos dispersos para as várias utilizações dos edifícios foi aprovado o Decreto de Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro, que juntamente com a Portaria nº 1532/2008, de 29 de Dezembro, correspondentes, respetivamente, ao regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios (RJ-SCIE), [6], e regulamento técnico (RT-SCIE), [7], constituem o corpo principal da legislação.

O Regulamento de segurança contra incêndios em edifícios (RSCIE) vem desta forma criar um conjunto de regras de forma a preservar a vida humana assente nas seguintes condições:

- Se possa proceder a evacuação ou salvamento dos seus ocupantes de forma segura;
- Permitir uma intervenção segura das equipas de Socorro;
- Reduzir e evitar as ocorrências de fogo;
- Limitar a propagação do fogo e fumo no edifício (interior e exterior);
- Assegurar a estabilidade do edifício por um período de tempo predeterminado.

O novo regime jurídico de SCIE, veio desta forma classificar os edifícios em 12 tipos de utilização e 4 categorias de risco, [6]. A separação das categorias de risco é feita em função dos sete fatores seguintes:

- Altura do Edifício;
- Número de pisos abaixo do plano de referência;
- Área Bruta;
- Espaço coberto ou ao ar livre;
- Efetivo (número máximo de utilizadores);
- Efetivo em locais de risco (D* ou E**);
- Locais de risco com saída independente e direta no plano de referência;
- Carga de incêndio.

* - D são locais de presença de pessoas de mobilidade ou perceção reduzidas

** - E são locais de dormida, em estabelecimento, que não caibam na definição de local de risco D

A partir de alguns destes sete fatores cada tipo de edifício é dividido nas 4 categorias de risco, sendo a primeira a menos gravosa e consequentemente a quarta a mais gravosa. No Quadro 2.1 é apresentada a relação entre utilização tipo e os fatores de avaliação e, nos Quadros 2.2, 2.3 e 2.4 são dados, como exemplos de caracterização da categoria de risco para as utilizações tipo habitação, administrativo e industrial (no qual se incluem os laboratórios), respetivamente, e dependentes dos fatores que permitem essa classificação.

Quadro 2.1 - Fatores de classificação do risco em função da utilização tipo. I) Habitacional; II) Estacionamento; III) Administrativo; IV) Escolares; V) Hospitalares e lares de idosos; VI) Espetáculos; VII) Desportivos; VIII) Hoteleiros; IX) Comerciais; X) Museus; XI) Bibliotecas; XII) Industriais, [8].

Utilização tipo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Altura	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Área bruta		X										
Saída direta ao exterior D, E				X	X		X					
Cobertura ao ar livre		X				X			X			X
Efetivo total			X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Efetivos locais D, E				X	X		X					
Nº pisos abaixo do plano de ref.	X	X				X		X	X		X	X
Carga de Incêndio modificada											X	X

Quadro 2.2 - Categorias de risco para Utilização tipo “Habitacional”, [7].

Categoria	Critérios referentes a utilização tipo I	
	Altura da UT I	Número de Pisos da UT I abaixo do plano de referência
1 ^a	≤9m	≤1
2 ^a	≤28m	≤3
3 ^a	≤50m	≤5
4 ^a	>50m	>5

Quadro 2.3 - Categorias de risco para Utilização tipo “Administrativo”, [7].

Categoria	Critérios referentes a utilização tipo III	
	Altura da UT III	Efetivo da UT III
1 ^a	≤9m	≤100
2 ^a	≤28m	≤1000
3 ^a	≤50m	≤5000
4 ^a	>50m	>5000

Quadro 2.4 - Categorias de risco para Utilização tipo “Industrial”, [7].

Categoria	Critérios referentes a utilização tipo XII		
	Integrada em edifício		Ao ar livre
	Carga de incêndio modificada da UT XII	Número de pisos da UT XII abaixo do plano de referência	Carga de incêndio modificada da UT XII
1 ^a	(*)≤500 MJ/m ²	0	(*)≤1000 MJ/m ²
2 ^a	(*)≤5000 MJ/m ²	≤1	(*)≤10000 MJ/m ²
3 ^a	(*)≤15000 MJ/m ²	≤1	(*)≤30000 MJ/m ²
4 ^a	(*)>15000 MJ/m ²	>1	(*)>30000 MJ/m ²

Notas (*) Nas utilizações-tipo XII, destinadas exclusivamente a armazéns, os limites máximos da carga de incêndio modificada devem ser 10 vezes superiores aos indicados neste quadro.

A resistência ao fogo traduz uma medida da capacidade resistente a um incêndio. É normalmente quantificada como o tempo para o qual o elemento construtivo pode garantir determinado critério quando submetido a um incêndio padrão. Durante um ensaio laboratorial de um elemento estrutural sujeito a incêndio, aquele tem que garantir a função de estabilidade a ações mecânicas durante determinado tempo de ensaio sem colapsar. Barreiras tais como lajes e paredes têm adicionalmente que garantir para além do critério de integridade (R), o de isolamento térmico (I) para prevenir a propagação do incêndio para além do compartimento de origem devendo a temperatura na face fria não ultrapassar determinado valor. Complementarmente o elemento não deverá fissurar para garantir estanquidade a fumos e gases quentes (E). É importante referir que o tempo associado à resistência ao fogo não expressa o tempo que uma estrutura tem que resistir a um fogo real, tal como a duração de um fogo real não poderá ser especificada com precisão.

Segundo o novo regulamento os elementos estruturais, de cada tipo de edifício, deverão possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de Suporte de Carga, R, isolamento térmico, I, e de

estanquidade, E, durante todas as fases do incêndio, ou então uma Resistência padrão mínima (classe de Resistência), [7].

Conhecendo-se a utilização tipo e a sua categoria de risco poderá definir-se a resistência padrão mínima através do Quadro 2.5, [8].

Quadro 2.5 - Resistências Mínimas para cada Utilização-tipo em função da categoria de risco, [8].

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R30 REI30	R60 REI60	R90 REI90	R120 REI120	Apenas suporte; Suporte e compartimentação
II, XI e XII	R60 REI60	R90 REI90	R120 REI120	R180 REI180	Apenas suporte; Suporte e compartimentação

A informação do Quadro 2.5 reflete as exigências definidas no regulamento Técnico de SCIE, o qual diz respeito à resistência ao fogo e em qual as letras R, E e I traduzem:

- Letra R - Exigência de estabilidade, a estrutura deverá manter a sua capacidade de suporte;
- Letra E - Estanqueidade, o elemento construtivo/ estrutural deve proteger das chamas e gases;
- Letra I - Isolamento térmico, a estrutura deve proteger os materiais contíguos do calor;

Cada elemento de um edifício deverá cumprir a resistência ao fogo num dos possíveis escalões de tempo (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360), e para cada função exigencial pelo período de tempo mínimo indicado em minutos. A título de exemplo pode-se referir o caso em que a resistência é avaliada pelo tempo que decorre desde o início do processo térmico normalizado (por exemplo, através da curva de incêndio padrão ISO 834) a que são submetidos os elementos estruturais, até deixarem de satisfazer as funções para as quais foram projetados.

2.3. EUROCÓDIGOS

Tanto o novo Regulamento (RSCIE) como os antigos, não mencionam os processos de cálculo para verificar as resistências requeridas. Apenas são sugeridas exigências estruturais que se devem cumprir. Por forma a se poder fazer um estudo da resistência ao fogo da estrutura, será necessário recorrer aos modelos definidos nos Eurocódigos.

O Eurocódigo consiste em cerca de quarenta normas com o objetivo de uniformizar a regulamentação, em estruturas, em território Europeu. No caso do cálculo de estruturas de Betão, para o caso de incêndio, destacam-se os 2 seguintes:

- Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1] – Cálculo Estrutural ao Fogo, onde se estabelecem as regras para o cálculo de estruturas de betão armado e pré esforçado em situação de incêndio e se definem as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais em função da temperatura;
- Eurocódigo 1, Parte 1-2, [3] – Ações em Estruturas Sujeitas a Incêndio, onde se faz a caracterização das ações térmicas.

Segundo o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], existe a possibilidade de estudo de estruturas em 4 níveis de complexidade:

- Análise de elemento isolado, onde ações indiretas do fogo pelo contacto com outros elementos não são consideradas;
- Análise de parte da estrutura, onde as interações entre elementos já são consideradas mas como sendo constantes ao longo do tempo;
- Análise global da estrutura onde as ações diretas e indiretas são consideradas. No entanto por se tratar de um método bastante complexo, na generalidade dos casos, não é utilizado;
- Ensaaios de resistência ao fogo que podem ser a escala real ou de amostras.

Em relação aos procedimentos de cálculo são apresentados também três com crescentes níveis de complexidade:

- Definição dos detalhes estruturais atendendo a soluções de projeto baseadas em valores tabelados;
- Métodos simplificados de cálculo para elementos tipo específicos;
- Métodos avançados de cálculo para simulação do comportamento estrutural dos elementos, subestruturas ou estruturas completas.

Em cada um dos níveis de estudo existe uma interligação com os modelos de incêndios e o método de estudo. A título de exemplo, enquanto os valores tabelados se baseiam na curva padrão de incêndio, os métodos simplificados e avançados de cálculo podem ser usados para esta e para as curvas paramétricas de incêndio.

Em qualquer dos modelos de cálculo preconizados a avaliação resulta, claro está, pelo lado da segurança em comparação com o expectável comportamento real do edifício. Os dois primeiros métodos são de uso fácil, minimizando o risco de má utilização. Contudo, devido à sua simplicidade, o seu campo de aplicação tem que estar bem definido, já que perde a validade fora das condições para os quais foram desenvolvidos.

O Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece também os valores de cálculo para as propriedades dos materiais e os fatores de combinação para as ações.

Para a determinação de uma suficiente de resistência ao fogo o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], define estas metodologias:

- Método dos Valores Tabelados
 - i Este método é baseado em tabelas que fornecem valores mínimos das dimensões da secção e das distâncias aos eixos das armaduras longitudinais das faces sujeitas a incêndio em função da resistência ao fogo que se pretende.
 - ii No Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], são apresentadas estas tabelas, que variam para cada tipo de elemento e características, e as suas regras de aplicação.
 - iii A função de compartimentação (estanquidade às chamas e gases quentes e isolamento térmico) das paredes e lajes é garantida pela utilização dos Valores Tabelados respetivos.
- Métodos Simplificados de Cálculo:
 - i O Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece vários métodos simplificados de cálculo para avaliar a resistência dos elementos estruturais de betão armado em qualquer instante e para qualquer tipo de incêndio. Estes métodos são baseados na redução da secção,

remanescendo as partes frias do elemento. Contudo, os perfis de temperatura na secção e dados relativos às alterações das propriedades materiais com a temperatura são igualmente necessários. São apresentados as duas tipologias de cálculo simplificado:

- O Método da isotérmica de 500°C que corresponde a uma redução geral da dimensão da secção correspondente à zona afetada pelo incêndio nas superfícies expostas. A espessura da zona afetada corresponde à média da profundidade da isotérmica de 500°C na zona em compressão da secção. O betão com temperaturas superiores a 500°C é assumido como não contribuinte para a capacidade de carga do elemento, enquanto a restante secção mantém os valores iniciais de resistência e módulo de elasticidade. Considerando a redução da resistência das armaduras, a capacidade de carga última pode ser determinada com métodos convencionais de cálculo, tal como o especificado no Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1].
- O Método das Zonas divide a secção em várias zonas, de espessura equivalente, em número mínimo de três e avalia a redução da resistência em cada zona. É calculada depois uma espessura degradada do elemento que se despreza, sendo esta dependente do tipo de elemento e das condições de exposição ao incêndio. Para a curva de incêndio padrão, o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece inúmeros diagramas que permitem uma determinação rápida da secção reduzida. Este método é mais preciso, embora mais laborioso comparado com o Método da isotérmica de 500°C.

Para a determinação dos perfis de temperatura necessários, recorre-se às isotérmicas publicadas para inúmeras secções e para incêndios padrão: Eurocódigo 2, Parte 1-2, Anexo A, [1]. Para outros tipos de incêndio, os perfis de temperatura deverão ser determinados utilizando modelos numéricos específicos, como por exemplo o SAFIR [4], o Diana [5] , o ANSYS, SUPER-TEMPCALC, etc.

Na Figura seguinte são apresentadas as relações entre os níveis de estudo, os modelos de incêndio e os métodos de cálculo:

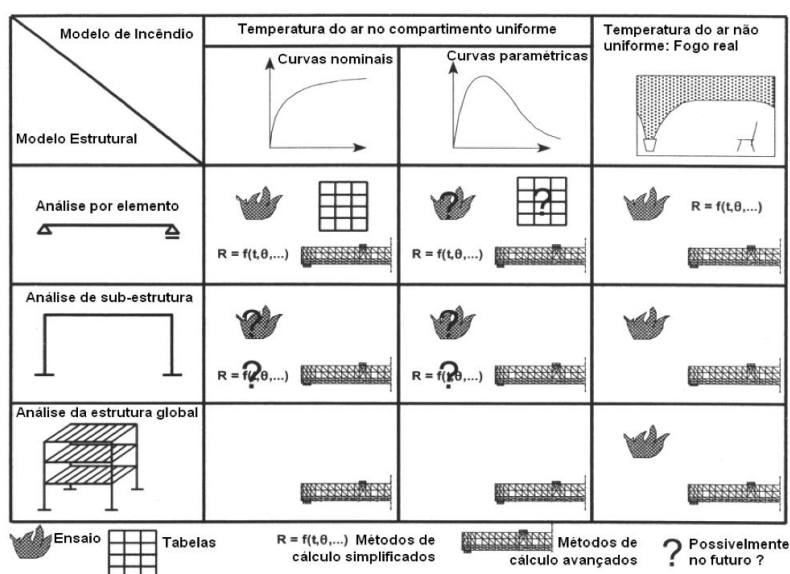


Fig. 2.6 - Esquematização dos modelos de cálculo, [2].

3

ESTADO DA ARTE - MÉTODOS SIMPLIFICADOS DO EUROCÓDIGO MODELOS SiFiRe E SIMFIRB

3.1. INTRODUÇÃO

No presente Capítulo são apresentados os métodos tabelados e simplificados segundo o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]. Para aplicação dos métodos simplificados será necessário ter em conta as características térmicas e mecânicas dos materiais a altas temperaturas, em particular do betão e do aço, usando como referência as propostas dadas pelo próprio Eurocódigo.

Nas condições de incêndio, as propriedades dos materiais em função da temperatura devem ser tidas em conta. Tal como a condição da curva de incêndio padrão, as propriedades são também definidas entre os 20°C e os 1200°C.

Os materiais de construção quando expostos ao incêndio alteram as suas propriedades naturais e em certos casos, sujeitar-se-ão à fluência, decomposição, desidratação e perda material. No caso do betão, as propriedades materiais que sofrem alterações mais relevantes são as: físicas (perda de humidade e destacamento de partes de material “spalling”) mecânicas (tensão de tração e compressão, módulo de elasticidade, relações tensão-extensão, coeficiente de dilatação térmica e fluência) e térmicas (densidade, calor específico e condutibilidade). No caso do aço, as propriedades materiais cuja variação se considera a altas temperaturas são as mesmas do betão, excetuando-se a fluência.

De todos os cálculos efetuados, para a verificação de segurança estrutural, deverá ainda ser feita uma verificação da ocorrência do destacamento explosivo do betão (“Spalling”). Para tal limitam-se as dimensões mínimas das secções dos elementos estruturais nas zonas de compressão. O gráfico da Figura 3.1 representa a relação entre esses limites com a tensão de compressão (σ_{fi}), calculada para as combinações de ações em situação de incêndio, que deverá ser garantida.

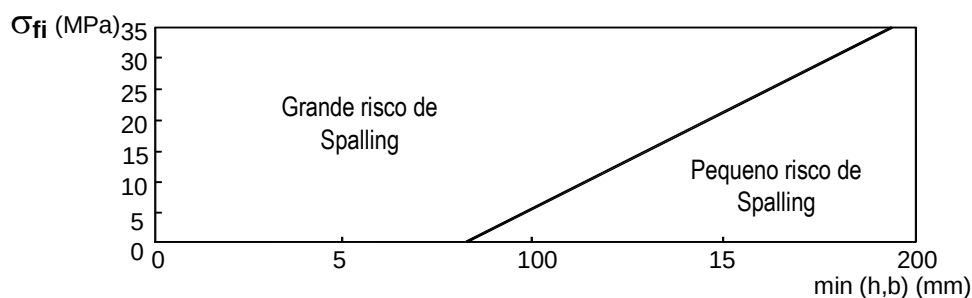


Fig. 3.1 - Relação entre σ_{fi} e h (ou b) para o risco de "Spalling", [4].

3.2. AÇÕES E CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS E MECÂNICAS DO BETÃO E DO AÇO A ALTAS TEMPERATURAS

3.2.1. INTRODUÇÃO

Grande parte das propriedades térmicas e mecânicas do betão e do aço aqui expressas são apresentadas no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], sendo sempre consideradas como valores característicos. Refira-se que alguns destes valores têm-se alterado ligeiramente de versão para versão dos Eurocódigos, [4]. Os valores de cálculo das propriedades térmicas e mecânicas dos betões e dos aços em situação de incêndio são expressas da seguinte forma:

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k(\theta)}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.1)$$

Em que:

- $X_{d,fi}$ - Valor de cálculo das propriedades térmicas ou mecânicas
- $X_{k(\theta)}$ - É o valor característico da propriedade em situação de incêndio, função da temperatura
- $\gamma_{M,fi}$ - Fator parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio (Pode-se tomar 1 para todas as propriedades)

No caso apenas das propriedades mecânicas é expresso pela expressão:

$$X_{k(\theta)} = K_{(\theta)} \cdot X_k \quad (3.2)$$

Em que:

- $K_{(\theta)}$ - Fator de redução da resistência ou deformação, função da temperatura
- X_k - Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente

A expressão (3.1) é aplicável se o incremento das propriedades for desfavorável para a segurança, se não for o caso deve se usar a expressão seguinte:

$$X_{d,fi} = X_{k(\theta)} \cdot \gamma_{M,fi} \quad (3.3)$$

3.2.2. VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O cálculo da resistência ao fogo de elementos com funções de suporte de cargas é composto pelas seguintes fases:

- Definição da ação térmica (tipo de incêndio);
- Definição das ações mecânicas a considerar em situação de incêndio (diretas e indiretas);
- Cálculo da distribuição de temperatura nos elementos para o instante de incêndio t ;
- Determinação do valor de cálculo dos efeitos das ações (térmicas e mecânicas) em situação de incêndio no instante t , $E_{d,fi,t}$;
- Determinação do valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t , $R_{d,fi,t}$;
- Verificação da condição (no domínio da resistência podendo alternativamente ser no domínio do tempo ou da temperatura).

A verificação de segurança em estruturas sujeitas a incêndio consiste em verificar se o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, é inferior ou igual à resistência de cálculo em situação de incêndio, $R_{d,fi}$, ou seja:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (3.4)$$

A ação do fogo é considerada uma ação de acidente, sendo que os efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, podem ser determinados para valores quase-permanentes ou frequentes das ações variáveis. O Eurocódigo 1, Parte 1-2 [3], recomenda a utilização de valores quase-permanentes da ação variável, determinando-se os efeitos da ação do fogo, $E_{d,fi}$, através da seguinte combinação:

$$E_{d,fi} = \sum \gamma_{GA} \cdot G_k + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.5)$$

Em que:

- G_k – Valor característico das ações permanentes
- $\psi_{1,1}$ e ψ_2 – Coeficientes de combinação
- $Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável principal
- $Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes ações variáveis
- A_d – Valor de cálculo da ação accidental, neste caso, representa o valor de cálculo das ações térmicas indiretas devido a incêndio
- γ_{GA} – Coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes em situação de incêndio

Os valores dos coeficientes de combinação, definidos no Eurocódigo 2, parte1-1, [9], são os dados pelo quadro seguinte, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Coeficientes de combinação, [9].

AÇÕES VARIÁVEIS		EUROCÓDIGO		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A	Habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B	Escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C	Salas de espetáculo	0,7	0,7	0,6
Categoria D	Comércio	0,7	0,7	0,6
Categoria E	Armazéns	1	0,9	0,8
	Cobertura	0	0	0
	Neve	0,6	0,5	0
	Vento	0,6	0,5	0

A expressão (3.5) pode ser simplificada uma vez que o valor de cálculo da ação accidental em situação de incêndio pode não ser considerado numa análise de elementos estruturais simples, como aquela que é realizada neste trabalho, através de um método simplificado de cálculo. Assim, tendo-se $A_d=0$ e tomando o coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes em situação de incêndio igual a 1, fica:

$$E_{d,fi} = \sum G_K + \psi_{1,1} Q_{K,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.6)$$

De acordo com o Eurocódigo 2 Parte 1-2, [1] os efeitos das ações em situação de incêndio podem ser calculados de forma simplificada, assim tem-se:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d \quad (3.7)$$

Em que:

- E_d – valor dos efeitos das ações da combinação de estado limite último à temperatura ambiente (valor calculado em fase de dimensionamento)
- η_{fi} – fator de redução

O fator de redução, η_{fi} , pode ser obtido através da expressão (3.8) ou simplificadamente pode ser considerado igual a 0,70.

$$\eta_{fi} = \frac{G_K + \psi_{fi} \times Q_{K,1}}{\gamma_G \times G_K + \gamma_{Q,1} \times Q_{K,1}} \quad (3.8)$$

A Figura 3.2 representa a variação do fator de redução, η_{fi} , em função da relação de cargas, $\xi=Q_{k,1}/G_K$, (relaciona a ação variável de base com as ações permanentes) para diferentes coeficientes de combinação, $\psi_{1,1}$.

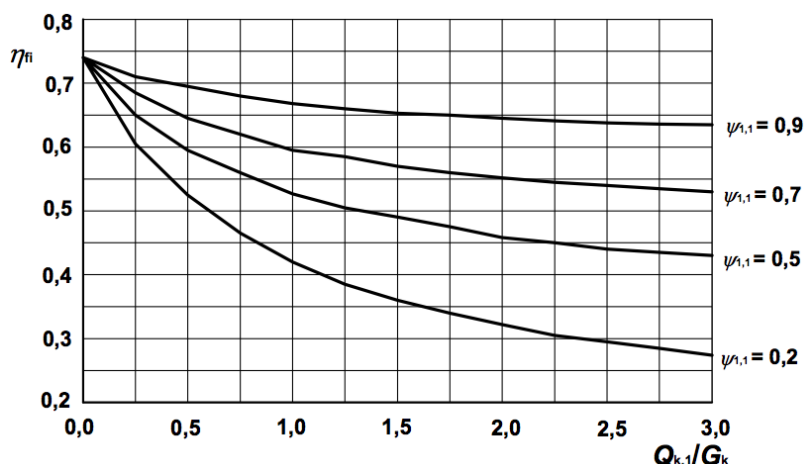


Fig. 3.2 - Variação de η_{fi} , função de $\xi = Q_{k,1}/G_k$, para diferentes valores de $\psi_{1,1}$.

3.2.3. BETÃO

O Betão é um dos materiais que apresenta melhor comportamento à ação do fogo principalmente por ser mau condutor de temperatura, não arder (não se acrescentando à carga de incêndio), não produzir fumo ou gases tóxicos (reduzindo o risco de vida aos ocupantes da estrutura) e por apresentar um baixo decréscimo das suas propriedades para temperaturas baixas.

Quando sujeito ao calor, o betão não responde apenas através de mudanças físicas como a expansão, mas também com alterações químicas. Esta resposta é particularmente complexa devido à não uniformidade do material. O betão é uma mistura de água, agregados e pasta de cimento, sendo que cada componente possui formas diferentes de reagir ao calor, como se pode ver no quadro seguinte.

Quadro 3.2 - Efeitos da temperatura nos constituintes do Betão, [8].

Temperatura do Betão[°C]	Mudanças provocadas pela Temperatura
100	Início expulsão da água pelos poros
250 - 400	Oxidação do aço, aparecimento do efeito de "Spalling"
450 - 550	Desidratação da Portlandite
550 - 600	Expansão térmica do quartzo
600 - 650	Descarbonatação do Calcário criando retrações
800 - 1200	Desintegração do calcário
1200	Betão começa a derreter

As propriedades térmicas e mecânicas serão apresentadas para betões correntes com inertes siliciosos e calcários com classes de resistência variável entre C12/15 e C50/60, para betões leves e para betões de alta resistência, com resistências entre 50 e 130MPa. O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], divide estes betões de alta resistência em três classes:

- Classe 1 – C50/67 e C60/75;
- Classe 2 – C70/85 e C80/95;

- Classe 3 – C90/105.

As principais diferenças referenciadas por Phan e Carino, [4], no comportamento ao fogo dos betões de alta resistência em relação a betões correntes são:

- A maior perda de resistência dos betões de alta resistência a altas temperaturas;
- A suscetibilidade dos betões de alta resistência ao “Spalling” para temperaturas abaixo dos 400°C.

Excetuando-se estes aspetos, assume-se que as propriedades térmicas dos betões de alta resistência podem ser consideradas como betões correntes na avaliação de estruturas ao fogo.

As propriedades térmicas dos betões leves são distintas dos betões correntes, pelo que são aqui explicitadas.

Os valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de betões correntes siliciosos e calcários sujeitos a elevadas temperaturas são fornecidos no Quadro 3.3 aplicáveis em modelos de cálculo linear ou não lineares. Contudo os possíveis ganhos de resistência na fase de arrefecimento não devam ser considerados. A Figura 3.3 apresenta graficamente os valores apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de betões correntes siliciosos e calcários sujeitos a elevadas temperaturas.

Temperatura do Betão[°C]	Betões correntes		Betões de alta resistência		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$		$f_{c,\theta} / f_{ck}$		
	Inertes siliciosos	Inertes calcários	Classe 1	Classe 2	Classe 3
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	-	-	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	0,90	0,75	0,75
200	0,95	0,97	0,90	0,75	0,70
250	-	-	0,90	0,75	0,68
300	0,85	0,91	0,85	0,75	0,65
400	0,75	0,85	0,75	0,75	0,45
500	0,60	0,74	0,60	0,60	0,30
600	0,45	0,60	0,45	0,45	0,25
700	0,30	0,43	0,30	0,30	0,20
800	0,15	0,27	0,15	0,15	0,15
900	0,08	0,15	0,08	0,11	0,08
1000	0,04	0,06	0,04	0,08	0,04
1100	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A redução do valor característico da resistência de compressão do betão, função da temperatura é definida à custa do coeficiente $k_c(\theta)$ em que:

$$f_{ck,\theta} = k_c(\theta) \cdot f_{ck,20^\circ C} \quad (3.9)$$

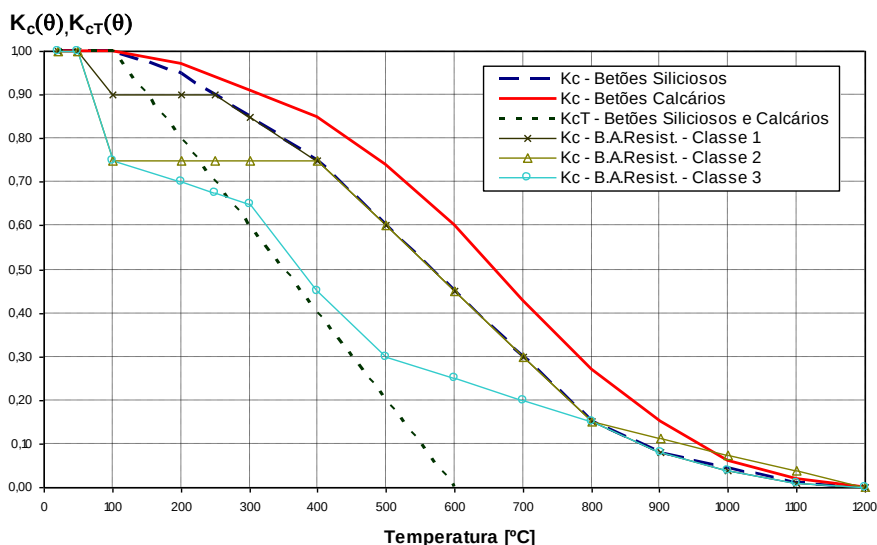


Fig. 3.3 - Coeficientes $k_c(\theta)$ e $k_{cT}(\theta)$ do betão com inertes siliciosos e calcários e betões de alta resistência para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.3, [4].

Na ausência de informação mais precisa os valores de $k_c(\theta)$ ($k_{cT}(\theta)$ para tração) podem, para o betão com inertes siliciosos e conservativamente para outros tipos de inerte ser considerados os da Figura 3.3. Em todas as situações a tensão última de tração deverá ser assumida como nula colocando-se do lado conservativo. Se em alguma circunstância for necessário considerar esta tensão, poderá, quer numa utilização de método de cálculo simplificado ou geral, utilizar os valores de $k_{cT}(\theta)$ da Figura 3.3.

3.2.4. Aço

O aço é normalmente utilizado em estruturas de betão de forma a compensar a fraca resistência à tração do betão. Ao contrário do betão o aço apresenta um mau comportamento ao fogo uma vez que é um bom condutor térmico.

A variação das suas características mecânicas com a temperatura é muito importante na avaliação da capacidade resistente do betão armado porque normalmente é aplicado nos limites das secções de betão, ficando mais exposto às elevadas temperaturas.

O aço é um material bastante homogêneo, sendo a sua temperatura de fusão da ordem dos 1550°C. Como se pode verificar pelos gráficos das curvas de incêndio, a ação do fogo não atinge temperaturas tão elevadas em situações usuais.

Tal como o betão, as propriedades resistentes do aço mantêm-se pouco alteradas até temperaturas da ordem dos 400°C, mas acima destas o decréscimo das propriedades é bastante mais elevado como se pode ver pelo Quadro 3.4 e Figura 3.4.

Refira-se que segundo o DNA, Documento Nacional de Aplicação, do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], em Portugal o aço classifica-se como Classe N.

Quadro 3.4 - Valores dos principais parâmetros para definição das relações tensão-extensão de aços correntes de Classe N sujeitos a elevadas temperaturas.

Classe de Aço	Classe N						
Temperatura do Betão[°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$			$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente e Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio
	$\varepsilon_{s,\theta} > 2\%$	$\varepsilon_{s,\theta} > 2\%$	$\varepsilon_{s,\theta} < 2\%$				
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A curva de valores de $k_s(\theta)$, função da temperatura, é representada na Figura 3.4 para aços da Classe N. São consideradas curvas distintas para aços laminados a quente e aços endurecidos a frio. Os valores das relações tensão limite de proporcionalidade $f_{sp,\theta}/f_{yk}$, a determinada temperatura e a tensão de cedência à temperatura ambiente $f_{sy,\theta}/f_{yk}$, e a relação entre o módulo de elasticidade a determinada temperatura e à temperatura ambiente $E_{s,\theta}/E_s$, são igualmente representadas na Figura 3.5 para as mesmas classes e tipos de aço.

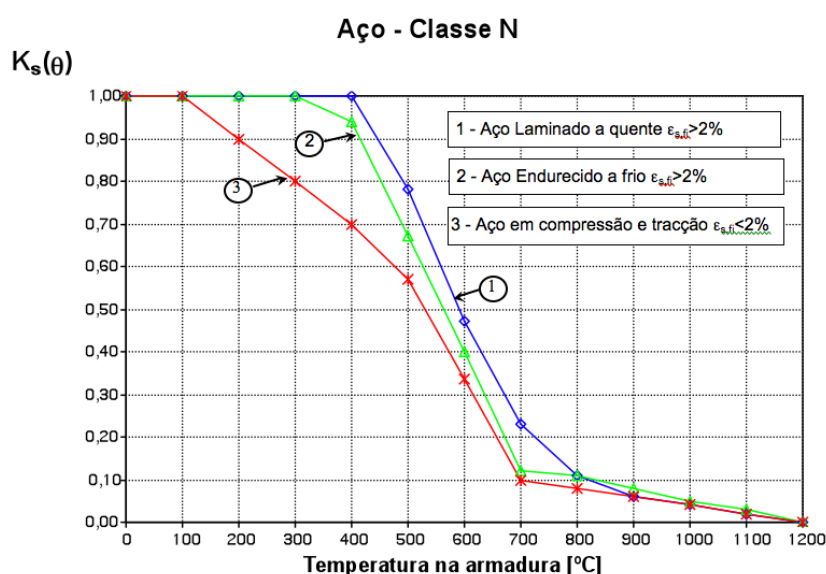


Fig. 3.4 - Coeficientes $k_s(\theta)$ do aço de Classe X para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].

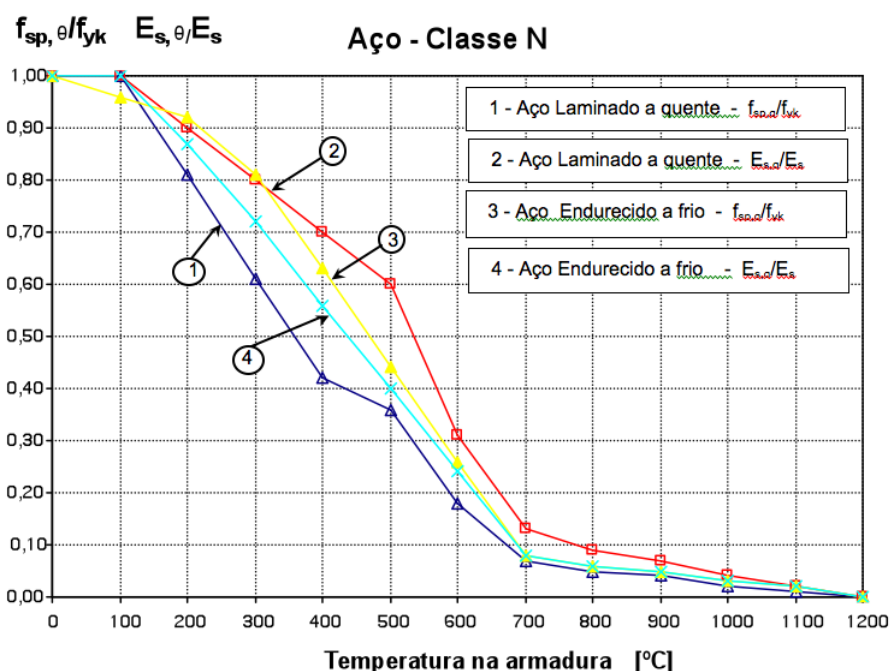


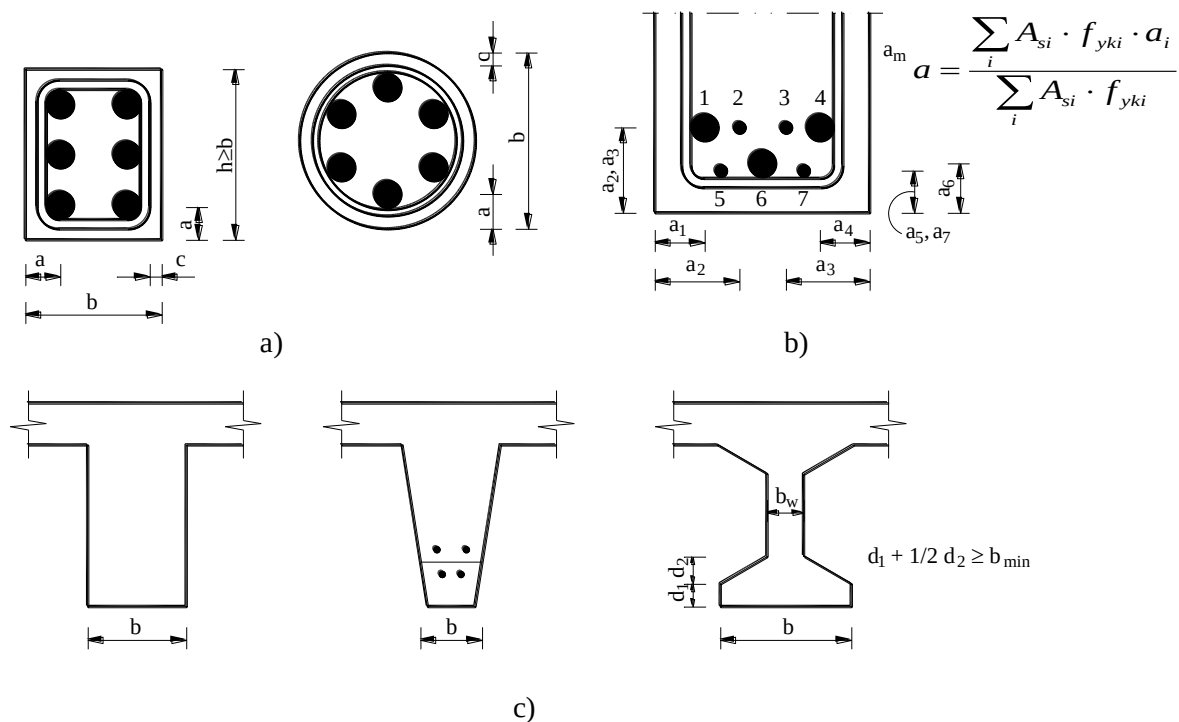
Fig. 3.5 - Coeficientes $f_{sp,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ do aço de Classe N para temperaturas elevadas de acordo com o Quadro 3.4, [4].

3.3. MÉTODOS DOS VALORES TABELADOS

Este método consiste numa verificação das dimensões mínimas das secções e as distâncias dos eixos dos varões à face do elemento dessa secção sujeita a incêndio, numa análise estrutural isolada. As tabelas dão valores da resistência ao fogo até um máximo de 240 minutos de exposição a um fogo caracterizado pela curva de incêndio padrão (ISO 834). Estes valores foram conseguidos numa base empírica sustentada em análises experimentais e teóricas apresentado valores conservativos não requerendo a verificação do esforço de torção, do esforço transversal ou do efeito “Spalling”.

As dimensões a, b e c, definidas na Figura 3.6, e aplicados nas tabelas, estão expressas em milímetros e aplicam-se a elementos de betão de densidade normal (peso específico entre 2000 e 2600kg/m³) com inertes siliciosos. O Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], permite a redução de 10% dos valores das tabelas para o betão com inertes calcários ou betões leves.

Em situações em que os diâmetros, o número de camadas de varões e a classe dos aços variem, deve-se calcular a distância “a” pela expressão indicada na Figura 3.6.



a) - distância da face exterior do elemento ao eixo das armaduras; b) - menor dimensão da secção transversal ou dimensão de referência da viga; h - altura da viga; c) - recobrimento nominal da armadura, [1].

Fig. 3.6 - Definição das variáveis geométricas usadas nos quadros seguintes.

Nas zonas dos elementos sujeitos à tração quando lajes e vigas simplesmente apoiadas estão sujeitas a flexão simples e para temperaturas dos varões de aço diferentes da temperatura crítica de 500°C, o valor de a deverá ser alterado segundo o seguinte procedimento:

- i) Avaliação da tensão no aço, $\sigma_{s,fi}$, para o valor da combinação de ações de acidente para a situação de incêndio, $E_{d,fi}$, sendo feita pela seguinte expressão:

$$\sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \quad (3.10)$$

Em que,

- γ_s - Fator parcial de segurança para o aço (igual a 1,15 segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9])
- $A_{s,req}$ - Área de aço requerido para o estado limite último de acordo com Eurocódigo 2, parte 1-1, [9]
- $A_{s,prov}$ - Área de aço utilizada
- $E_{d,fi}$ - Pode ser calculada através da combinação de ações de acidente para a situação de incêndio (3.4) ou pela fórmula simplificada (3.5)
- E_d - Valor dos efeitos das ações da combinação de estado limite último à temperatura ambiente (valor calculado em fase de dimensionamento)

ii) Avaliação da temperatura crítica do aço θ_{cr} correspondente ao fator de redução $K_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fi} / f_{yk}$, utilizando a Curva 1 da Figura 2.11 do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], para o aço corrente ou as outras curvas para o aço de pré-esforço;

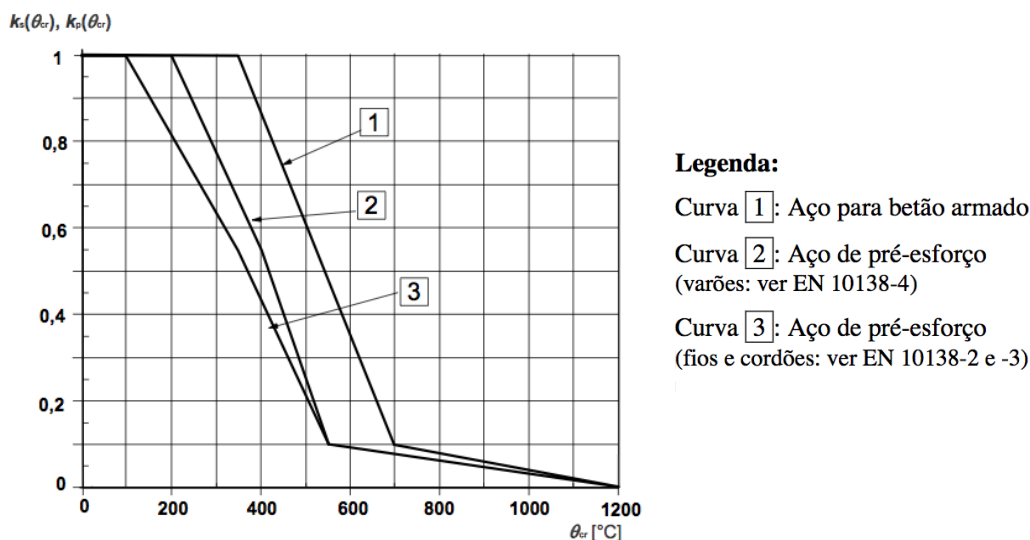


Fig. 3.7 - Curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado e de pré-esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, [1].

iii) O ajuste do valor de a das tabelas para a nova temperatura crítica θ_{cr} é feito através da equação:

$$\Delta a = 0,1 \cdot (500 - \theta_{cr}) \quad [\text{mm}] \quad 350^\circ\text{C} < \theta_{cr} < 700^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

A dimensão b pode, noutros casos, ser objeto de correção para elementos sujeitos à tração ou vigas em que θ_{cr} seja inferior a 400°C . A dimensão b deve, neste caso, ser incrementada da seguinte forma:

$$b_{\text{mod}} \geq b_{\text{min}} + 0,8 \cdot (400 - \theta_{cr}) \quad [\text{mm}] \quad (3.12)$$

Consideram-se os seguintes valores de temperatura crítica para os elementos pré-esforçados:

- 400°C para elementos varão de pré-esforço;
- 350°C para cordão ou fio de pré-esforço.

Se não for exigida uma verificação especial como a já referida para os elementos pré-esforçados sujeitos a tração, as vigas pré-esforçadas deverão ver o valor de a incrementado do seguinte valor:

- 10 mm - para varões pré-esforçados correspondendo a $\theta_{cr} = 400^\circ\text{C}$;
- 15 mm - para cordões ou fio de pré-esforço correspondendo a $\theta_{cr} = 350^\circ\text{C}$.

Deverá ser tido em atenção que a verificação do recobrimento mínimo segundo o Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], deverá ser verificada mesmo usando os valores tabelados, visto alguns desses valores existirem apenas para que se possa proceder a interpolações, aspeto contemplado no modelo numérico desenvolvido no âmbito desta dissertação. Também deve ser sempre tido em atenção que os métodos tabelados, apesar de serem de mais rápida aplicação, só são aplicáveis se forem cumpridas as suas regras de aplicação, reduzindo assim o seu interesse comparativamente com os métodos simplificados.

De seguida irá ser feita uma apresentação, para vigas, das regras e modo de aplicação para as tabelas.

3.3.1. VIGAS

3.3.1.1. Introdução

Nesta secção são apresentadas as tabelas e regras para a aplicação dos métodos tabelados para vigas simplesmente apoiadas e vigas contínuas, estas tabelas foram feitas considerando exposição ao fogo em 3 faces sendo que a face superior se encontra protegida pelo pavimento, a sua aplicação para 4 faces expostas é possível segundo algumas condições, também apresentadas.

Para vigas em “T” com alma de espessura variável (Figura 3.6 c) e em “I”, o valor mínimo de b , medido ao nível duma linha que passa pelo centro de gravidade da secção das armaduras ou uma linha que passa a uma cota d_{ef} calculada pela expressão (3.13), respetivamente:

Em todos os casos há que respeitar a relação:

$$d_{ef} = d_1 + 0,5d_2 \geq b_{min} \quad (3.13)$$

sendo b_{min} o valor mínimo de b indicado nas tabelas;

Quando $b > 1,4b_w$ e $b \cdot d_{ef} < 2b_{min}^2$ o valor de a indicado nas tabelas deve ser substituído por:

$$a_{ef} = a \left(1,85 - \sqrt{\frac{b_w}{b} \cdot \frac{d_{ef}}{b_{min}}} \right) \geq a \quad (3.14)$$

Em que:

d_{ef} - é dado pela expressão (3.13).

b_{min} - é a menor largura mínima da viga fornecida pelas tabelas.

No caso de vigas protegidas na face superior, as concentrações de temperaturas são mais elevadas nos cantos inferiores dos elementos. Por este motivo é feito um acréscimo de 10mm nas distâncias mínimas tabeladas dos eixos dos varões à face lateral do elemento dessa secção, para todos os valores das secções superiores até aos dados pelas colunas de cor cinzenta de cada quadro.

3.3.1.2. Vigas simplesmente apoiadas

A resistência ao fogo adequada para as vigas de betão armado ou pré-esforçado pode ser atingida se forem cumpridos os valores do Quadro 3.5 para vigas simplesmente apoiadas no que diz respeito à largura mínima da viga, b_{min} , e à distância do eixo da armadura ao exterior, a . Para vigas em “I” deve ainda verificar-se uma espessura mínima b_w para a alma.

Quadro 3.5 - Dimensões mínimas da alma de vigas simplesmente apoiadas e da distância ao eixo dos varões para vigas de betão armado ou pré-esforçado [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]						
	Espessura da alma b_w			Possíveis combinações entre a e b_{min} em que a é a distância média e b_{min} a largura da viga			
	Classe WA	Classe WB	Classe WC				
R 30	80	80	80	$b_{min} = 80$ $a = 25$	120 20	160 15*	200 15*
R 60	100	80	100	$b_{min} = 120$ $a = 40$	160 35	200 30	300 25
R 90	110	100	100	$b_{min} = 150$ $a = 55$	200 45	300 40	400 35
R 120	130	120	120	$b_{min} = 200$ $a = 65$	240 60	300 55	500 50
R 180	150	150	140	$b_{min} = 240$ $a = 80$	300 70	400 65	600 60
R 240	170	170	160	$b_{min} = 280$ $a = 90$	350 80	500 75	700 70

- Notas
- (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
 - (1) - No caso de armadura disposta numa só camada, deve considerar-se $a_{sd}=a+10\text{mm}$ (o Eurocódigo 2 considera que a_{sd} pode ser igual a 'a' para valores pelo menos iguais à coluna cinzenta);
 - (2) - Para armaduras de pré-esforço há que fazer correções (Secção 5.2(5) do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1];
 - (3) - $a_s = a+10\text{mm}$ – distância do eixo dos varões extremos à face lateral da viga para vigas com um único nível de armaduras.

3.3.1.3. Vigas contínuas

A resistência ao fogo adequada para as vigas de betão armado ou pré-esforçado pode ser atingida se forem cumpridos os valores do Quadro 3.6, para vigas contínuas, no que diz respeito à largura mínima da viga, b_{min} , e a distância do eixo da armadura ao exterior, a .

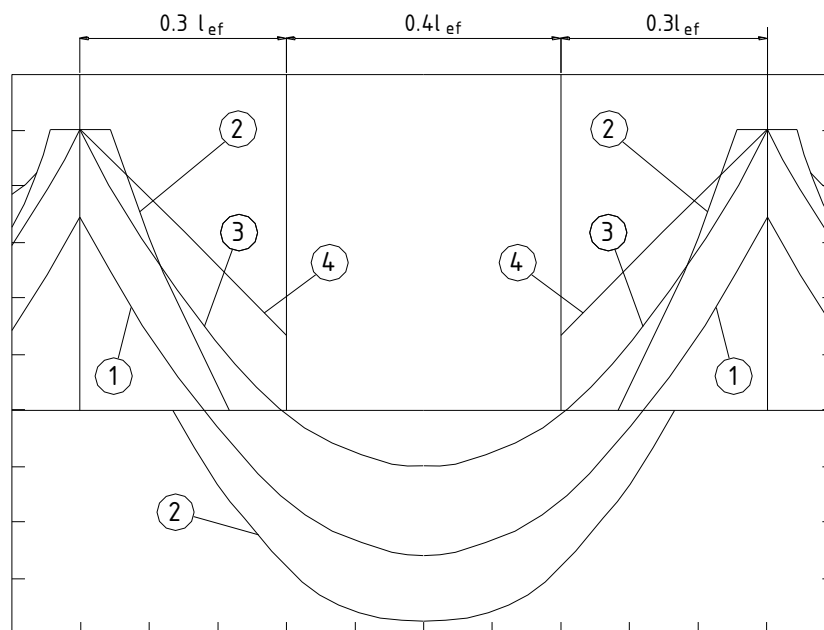
No entanto estes valores só serão válidos se a redistribuição das armaduras, em fase de dimensionamento, for conhecida e inferior a 15%. Se esta condição não se verificar as vigas devem ser consideradas como sendo simplesmente apoiadas.

A área da armadura superior sobre cada suporte intermédio para classes de resistência ao fogo R90 ou superior, para distâncias até $0,3 l_{eff}$ (Figura 3.8) não poderá ser menor que o valor dado pela expressão:

$$A_{s,req}(x) = A_{s,req}(0) \cdot \left(1 - 2,5 \frac{x}{l_{eff}} \right) \quad (3.15)$$

Em que:

- x - É a distância da secção considerada até ao eixo do suporte ($x \leq 0,3 l_{eff}$);
- $A_{s,req}(0)$ - Área da armadura superior requerida na secção considerada (à distância x) mas nunca inferior a $A_s(x)$ exigida pelo Eurocódigo 2, parte 1-1, [9];
- l_{eff} - É o vão efetivo definido no Eurocódigo 2, parte 1-1, [9], ou o maior dos vãos adjacentes.



- (1) Diagrama de momentos fletores para a combinação de ação com incêndio e $t=0$;
 (2) Envolvente dos momentos fletores atuantes a serem suportados pelas armaduras de acordo com o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1];
 (3) Diagrama de momentos fletores nas condições de incêndio;
 (4) Envolvente dos momentos fletores resistentes de acordo com a equação (3.29) do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

Fig. 3.8 - Envolvente dos momentos fletores resistentes em situação de incêndio.

Nas vigas em “T”, a largura mínima da alma, numa extensão igual a duas vezes a altura da viga, considerada para um e outro lado dos apoios intermédios, não deve ser menor do que a correspondente ao valor mínimo de b_{min} indicado na coluna sombreada do Quadro 3.6.

Para condições especiais de apoios intermédios com esforços transversos e momentos fletores negativos muito elevados é muito importante aumentar a espessura da viga e da alma de acordo com o Quadro 3.7 e atender às seguintes regras para resistências entre R120 e R240:

- Liberdade de rotação nos apoios;
- $V_{Ed} > 2/3 V_{Rd,max}$ no apoio intermédio,

Em que,

$V_{Rd,max}$ – Valor de cálculo do Esforço transversal máximo calculado de acordo com a secção 6 do Eurocódigo 2, parte 1-1, [11];
 V_{Ed} – Valor de cálculo do Esforço transversal aplicado à temperatura ambiente.

Quadro 3.6 - Dimensões mínimas da largura da viga e da distância ao eixo dos varões para vigas contínuas de betão armado ou pré-esforçado, [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]						
	Espessura da alma b_w			Possíveis combinações entre a e b_{min} em que a é a distância média e b_{min} a largura da viga			
	Classe WA	Classe WB	Classe WC				
R 30	80	80	80	$b_{min} = 80$ $a = 15^*$	160 12*		
R 60	100	80	100	$b_{min} = 120$ $a = 25$	200 12		
R 90	110	100	100	$b_{min} = 150$ $a = 35$	250 25		
R 120	130	120	120	$b_{min} = 200$ $a = 45$	300 35	400 35	500 30
R 180	150	150	140	$b_{min} = 240$ $a = 60$	400 50	550 50	600 40
R 240	170	170	160	$b_{min} = 280$ $a = 75$	500 60	650 60	700 50

- Notas
- (*) - Normalmente está condicionado pelo recobrimento mínimo à temperatura ambiente;
 - (1) - No caso de armadura disposta numa só camada, deve considerar-se $a_{sd}=a+10\text{mm}$ (o EC considera que a_{sd} pode ser igual a a para valores de b pelo menos correspondentes à coluna cinzenta);
 - (2) - Para armaduras de pré-esforço há que fazer correções (Secção 5.2 (5) do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]).

Quadro 3.7 - Larguras mínimas da viga e da alma para vigas em “I” de betão armado ou pré-esforçado [1].

Resistência ao Fogo	Dimensões mínimas [mm]
	Largura da viga b_{min} e Espessura da alma b_w
R 120	220
R 180	380
R 240	480

3.3.1.4. Vigas expostas nas quatro faces

No caso de vigas com todas as faces expostas ao fogo, podem aplicar-se as regras e tabelas anteriormente apresentadas desde que sejam observadas as seguintes disposições:

- Altura da viga não deve ser inferior ao valor de b_{min} correspondente à classe de resistência ao fogo em causa;
- A área da secção transversal da viga não deve ser inferior a $A_c > 2b_{min}^2$ e b_{min} é fornecido em qualquer dos quadros referidos para as tabelas correspondentes, simplesmente apoiadas ou contínuas;

3.4. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE CÁLCULO

3.4.1. INTRODUÇÃO

Os métodos simplificados de cálculo são utilizados para calcular a capacidade de carga dos elementos aquecidos e em comparação com os esforços obtidos, para a situação de incêndio, permitem verificar a segurança dos elementos estruturais. Estes métodos são descritos no Anexo B presente no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

O Anexo B fornece dois métodos simplificados de cálculo, designados de Método da Isotérmica dos 500°C e Método das Zonas para elementos sujeitos a esforços axiais e momentos fletores. O segundo método deverá ser apenas utilizado para a curva de incêndio ISO 834, enquanto o primeiro poderá também ser utilizado com curvas de incêndio paramétricas.

No anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], são apresentados perfis de temperatura, para inúmeras secções e inúmeros tempos de exposição ao incêndio ISO 834, que podem ser usados para a aplicação dos métodos simplificados.

O Método da Isotérmica dos 500°C baseia-se no pressuposto que o betão acima dos 500°C perde a totalidade da sua resistência enquanto se considera que o restante betão se encontra à temperatura ambiente. O método das Zonas considera a redução da secção baseando-se na distribuição da resistência e rigidez, dependente do campo de temperaturas em várias zonas numa parede equivalente ao elemento em análise, seguindo-se um determinado procedimento de cálculo.

Em ambos os métodos simplificados considera-se que o aço irá sofrer uma redução da sua capacidade resistente em função da temperatura, como indicado na secção 3.2.3 do presente capítulo.

Os resultados dos dois métodos apresentados irão ser conservativos, mas por serem de fácil aplicação, menos conservativos e mais abrangentes que os métodos tabelados, o seu uso é aconselhado.

Ambos os métodos simplificados de cálculo são aplicáveis a secções de betão armado e pré-esforçadas sujeitas a esforços axiais, momentos fletores e qualquer combinação daqueles esforços.

As seguintes hipóteses simplificativas são consideradas em ambos os métodos:

- As tensões de corte e torção não são consideradas no cálculo;
- Não é considerado qualquer gradiente de temperatura ao longo do comprimento dos membros estruturais;
- Não foi considerado o fenómeno de “Spalling”.

3.4.2. MÉTODO DA ISOTÉRMICA DOS 500°C

Este método aplica-se à exposição do incêndio ISO 834 ou qualquer outro regime de aquecimento com campos de temperatura similares como a exposição a incêndios paramétricos. Este método é válido apenas para valores mínimos de largura da secção dados no Quadro 3.8 para exposição ao incêndio padrão ISO 834 e para exposição a incêndios paramétricos, para um fator de abertura $O \geq 0,14m^{1/2}$ (Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]), e carga de incêndio, também especificados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Largura mínima da secção em função da resistência ao fogo e da densidade de carga de incêndio, para o incêndio padrão e curvas paramétricas, respetivamente.

Resistência ao fogo	R60	R90	R120	R180	R240
Largura mínima (mm)	90	120	160	200	280
Carga de incêndio (MJ/m ²)	200	300	400	600	800
Largura mínima (mm)	100	140	160	200	240

Na Figura 3.9 são apresentados três exemplos de como deve ser feita a redução pela isotérmica dos 500°C:

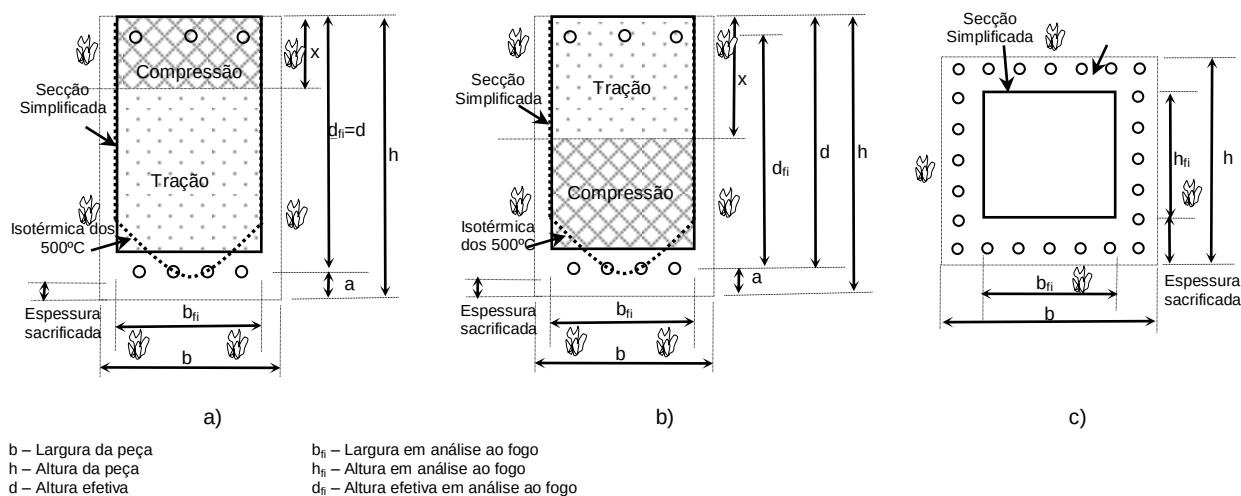


Fig. 3.9 - Isotérmica dos 500°C e secção reduzida. Exposição ao fogo em três lados: a) Zona em tração exposta; b) Zona em compressão exposta; c) Exposição nos quatro lados, [4].

3.4.3. MÉTODO DAS ZONAS

O Método das Zonas só é aplicável ao incêndio padrão ISO 834, sendo um método mais trabalhoso de encontrar a secção reduzida mas que ao mesmo tempo se torna mais rigoroso. Aspeto este que se pretendeu avaliar em trabalhos anteriores quando se utilizaram estes métodos para verificação dos elementos estruturais de um projeto.

A secção é assumida como uma “parede equivalente”, ver Figura 3.10 g), tomando o valor da largura da secção, b , (altura, h , no caso de lajes) o valor de W ou $2W$ conforme esteja exposta ao fogo numa face ou nas duas, respetivamente.

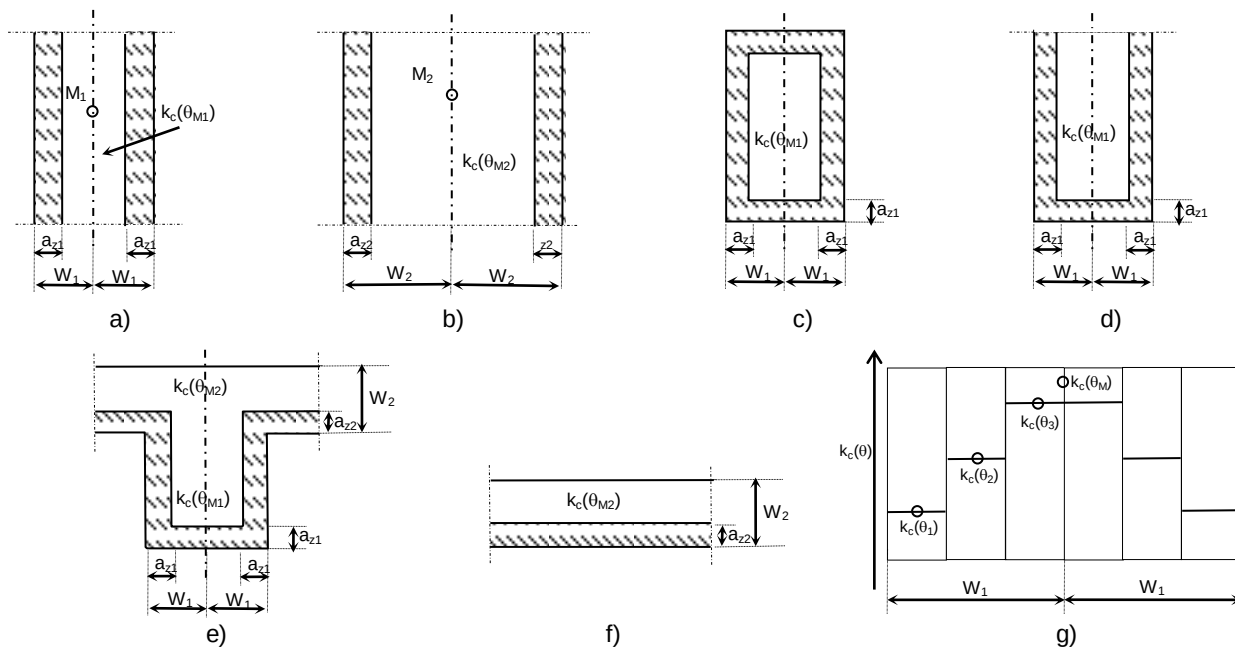


Fig. 3.10 - Definição da variável a_z e W – Redução da resistência e da seção para peças sujeitas a incêndio: a) Parede; b) Parede espessa; c) Pilar; d) Extremo da parede; e) Viga; f) Laje; g) “Parede equivalente”, divisão da parede exposta ao incêndio em ambas as faces em zonas para o cálculo de redução da resistência e a_z , [4].

Para as partes inferiores extremas dos elementos retangulares expostos ao fogo, em que a largura é inferior à altura, o valor de a_z é assumido como igual ao valor calculado para os lados, (extremo da parede, pilar e viga).

O valor de a_z , é calculado da forma seguinte:

- Metade da espessura da parede é dividida em n zonas paralelas de igual espessura (m) em que $n \geq 3$ (Figura 3.10 g);
- A temperatura é calculada para o centro de gravidade de cada zona (Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1]);
- As reduções correspondentes das resistências à compressão do betão de cada zona, $k_c(\theta_i)$, são determinadas (Quadro 3.3);
- O ponto M é o centro de gravidade resistente da “parede equivalente”. O coeficiente de redução médio o qual permite ter em conta a influência da temperatura dentro de cada zona, é calculado através da equação (3.16), em que n é o número de zonas paralelas na largura W , em que W é metade da largura da secção:

$$k_{c,m} = \frac{(1 - 0,2/n)}{n} \cdot \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (3.16)$$

- A largura da zona afetada para as vigas e lajes é calculada com a expressão (3.17);

$$a_z = w \cdot \left(1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right) \quad (3.17)$$

- Para paredes e pilares, em que o efeito de segunda ordem tem que ser considerado usa-se a expressão (3.18) ou através das Figuras B.5b e B.5c do Anexo B do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

$$a_z = w \cdot \left(1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right) \quad (3.18)$$

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade da secção reduzida são assumidos como constantes e iguais aos calculados para o ponto M.

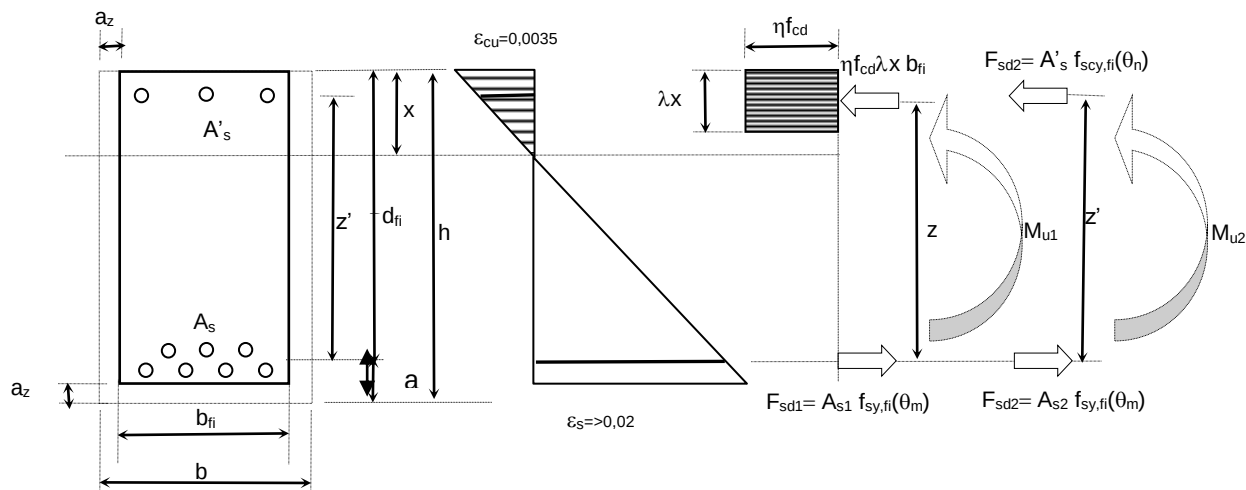
3.4.4. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

3.4.4.1. Procedimento de cálculo da capacidade resistente de uma secção de betão armado exposta ao esforço axial e ao momento fletor.

O procedimento de cálculo para determinar a capacidade resistente de uma secção de betão armado sujeito a flexão simples e flexão composta em situação de incêndio é comum para ambos os métodos:

1. Determinação do campo de temperaturas na secção da peça para um determinado instante de tempo e para uma determinada exposição ao fogo;
2. Redução da secção de betão - Determinação de b_{fi} , h_{fi} e d_{fi} ;
3. Determinação da temperatura nas armaduras nas zonas de tração e/ou compressão;
4. Redução da resistência da armadura devido à temperatura;
5. Utilização de um método de cálculo à temperatura ambiente para a realização do cálculo da capacidade resistente da secção (do momento fletor e esforço axial últimos) com as propriedades mecânicas reduzidas pelo efeito da temperatura do incêndio;
6. Comparação daquele valor com o valor do momento atuante devido à ação de projeto.

O passo 5 referido anteriormente será agora explanado suportando-se na análise da Figura 3.11. Apresenta-se na Figura 3.11 os parâmetros geométricos que têm que ser definidos quando se calcula o momento fletor resistente das vigas. A figura mostra também a forma como se processa o cálculo da capacidade de carga de uma secção em situação de incêndio na sua situação mais geral, isto é com armadura de tração e compressão.



- x - Profundidade do eixo neutro
- b - Largura original da peça
- h - Altura original da peça
- b_{fi} - Largura efetiva da secção reduzida
- h_{fi} - Altura da secção reduzida
- d_{fi} - Altura efetiva da secção reduzida
- z - braço do momento relativo à zona em compressão de betão e tração das armaduras
- z' - braço do momento relativo às armaduras em tração e compressão
- A_s - $A_s = A_{s1} + A_{s2}$ - Área de armadura em tração
- A_{s1} - Área de armadura em tração que se encontra em equilíbrio com a zona em compressão do betão
- A_{s2} - Área de armadura em tração que se encontra em equilíbrio com a armadura em compressão
- A'_s - Área de armadura em compressão
- $f_{cd,fi}(20)$ - Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão à temperatura ambiente ($= f_{ck} / \gamma_{c,fi}$)
- $f_{sd,fi}(\theta_m)$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio à temperatura média do nível das armaduras
- $f_{sdc,fi}(\theta_m)$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à compressão do aço em situação de incêndio à temperatura média do nível das armaduras
- w_k - Percentagem mecânica de armadura da secção reduzida
- θ_m - Temperatura das armaduras de compressão ou tração para um determinado instante. O cálculo é feito à custa da temperatura média dos varões
- f_{ck} - Valor característico da resistência da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade, determinado em provetes prismáticos
- η - Parâmetros que definem a altura efetiva da zona de betão em compressão e a resistência efetiva do betão

$\eta=1$	$f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$
$\eta=0,8 \cdot (f_{ck}-50)/400$	
$\eta=1,0 \cdot (f_{ck}-50)/200$	$50 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$

Nota 1: O valor das temperaturas para os valores das tensões $f_{sd,fi}(\theta)$ e $f_{sdc,fi}(\theta)$ são naturalmente distintos.

Fig. 3.11 - Distribuição de tensões e extensões no estado limite último para uma secção retangular de betão armado reduzida com armadura de tração e compressão.

O momento fletor resistente da secção reduzida é calculado através da seguinte expressão:

$$M_u = M_{u1} + M_{u2} \quad (3.19)$$

Com:

$$M_{u1} = A_{s1} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m) \cdot d_{fi} \cdot \left(1 - \frac{w_k}{2}\right) \quad (3.20)$$

$$M_{u2} = A_{s2} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m) \cdot z' \quad (3.21)$$

$$w_k = \frac{A_{sl} \cdot f_{sd,fi}(\theta_m)}{b_{fi} \cdot d_{fi} \cdot f_{cd,fi}(20)} \quad (3.22)$$

3.4.4.2. Extensão no aço

O procedimento normal quando se projeta uma viga de betão é o de assumir que é normalmente armada (a extensão do aço ultrapassa o valor de 2%). Compreende-se então a adoção, no cálculo de M_u , do valor de $f_{sd,fi}(\theta)$ que prescinde da consideração da interação simultânea da temperatura com a extensão (em vez de $f_{sd,fi}(\theta/\varepsilon)$). Esta simplificação representa que a avaliação do momento resistente prescinde da consideração da interação simultânea da temperatura e da extensão. O procedimento de cálculo é assim simplificado mas deverá fazer-se a verificação se a extensão do aço ultrapassa o valor de 2%. Verificação que pode ser realizada com a expressão seguinte na qual se considera a extensão para o betão igual a 0,0035 (correspondente à tensão de compressão última do betão).

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \frac{(d_{fi} - x)}{x} \quad (3.23)$$

De facto, realizações experimentais e cálculos complementares mostraram que, se as armaduras de tração são a causa de colapso então, a tensão de cedência corresponde a pelo menos uma extensão de 2%. Os cálculos efetuados admitem o valor de 2% para as armaduras de tração.

3.4.4.3. Posicionamento das armaduras

A determinação da altura da secção reduzida para secções com mais do que uma camada de varões, e estes eventualmente com diâmetros diferentes, requer o cálculo da distância a , distância entre o centro das armaduras e a face aquecida da secção reduzida, como se esquematiza na Figura 3.12.

A determinação da altura útil da secção reduzida, d_{fi} , requer o cálculo da posição do centro de gravidade das armaduras, “a”. Refira-se que, para o Caso I, seguindo a metodologia atual do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], o cálculo de a fica aquém do correto na medida em que cada nível de armaduras pode ter diferentes áreas de aço. O cálculo é de qualquer forma conservativo porque na maioria das vezes, a colocação de maior quantidade de armadura faz-se no nível inferior das várias camadas.

Distribuição geométrica das armaduras	CASO I	CASO II
Redução média da resistência do nível de armadura em relação ao acréscimo de temperatura	$k_v(\theta) = \frac{\sum k_s(\theta_i)}{n_v} \quad (3.24)$	
Resistência média do grupo de armadura em relação ao acréscimo de temperatura		$k(\varphi) \cdot f_{sd,fi} = \frac{\sum_i [k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i]}{\sum_i A_i} \quad (3.26)$
Distância a, desde o bordo inferior da secção reduzida até ao centro de gravidade das armaduras	$a = \frac{\sum a_v \cdot k_v(\theta)}{\sum k_v(\theta)} \quad (3.25)$ (1)	$a = \frac{\sum_i a_i \cdot k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i}{\sum_i k_s(\theta_i) \cdot f_{sd,i} \cdot A_i} \quad (3.27)$
θ_i - Temperatura na armadura i $K(\theta_i)$ - Redução da resistência da armadura i devido à temperatura θ_i. $K_v(\theta)$ - Redução média da resistência do nível da armadura v n_v - Número de armaduras no nível v $f_{sd,i}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras ordinárias à temperatura ordinária. $f_{sd,fi}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras em situação de incêndio $k(\varphi) \cdot f_{sd,fi}$ - Valor de cálculo da tensão de cedência à tração do grupo das armaduras em situação de incêndio a - Distância entre as armaduras e o bordo inferior da secção reta reduzida a_v - Distância entre a camada v de varões e o bordo inferior da secção reta reduzida a_i - Distância desde o bordo inferior da secção reduzida à armadura i A_i - Área da secção da armadura i		
Nota: (1) Para apenas dois níveis de armadura o Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], admite a utilização de outra expressão: $a = \sqrt{a_1 \cdot a_2} \quad (3.45)$ Note-se que este cálculo fica aquém do correto na medida em que cada nível pode ter diferentes áreas de armadura. De qualquer forma, é conservativo porque na maioria das vezes, a colocação de maior quantidade de armadura faz-se no nível inferior. Refira-se que em versões anteriores do Eurocódigo o procedimento contemplava a área de armadura.		

Fig. 3.12 - Cálculo da distância entre o centro das armaduras e a face sujeita a incêndio, a.

3.5. MODELO SiFiRe

3.5.1. INTRODUÇÃO

Em Portugal a Regulamentação de Segurança Contra Incêndio obriga a que se faça um dimensionamento de todo o tipo de estruturas seguindo o regime jurídico e o regulamento técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, RJ-SCIE, [6], e RT-SCIE, [7]. Nesta regulamentação são apresentadas as disposições técnicas e específicas a cumprir para se verificar a segurança contra incêndios em edifícios, em particular, referindo num dos pontos a necessidade de verificação da resistência estrutural em escalões de tempo, como se viu no Quadro 2.5 do Capítulo 2.

O RJ-SCIE exige que se faça a verificação estrutural mas não indica como, nem indica normas ou métodos a utilizar. A verificação ao fogo das estruturas foi muitas vezes negligenciada em Portugal

porque o mesmo se passava com a regulamentação anterior, ou seja, não havia uma imposição clara e descrição clara dos métodos a utilizar. Em Maio de 2010 é lançado o primeiro Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], em versão Portuguesa com o Anexo Nacional, que vem criar a primeira norma europeia e Portuguesa do tipo no nosso país, apesar da versão Inglesa estar disponível há anos.

Nos novos Eurocódigos são indicados os métodos analisados no capítulo anterior que, embora não tenham um grau de complexidade muito elevado, são métodos em que a sua aplicação numa estrutura completa se torna um processo muito moroso.

Os Métodos Tabelados por serem métodos de consulta de tabelas deveriam demorar menos tempo na sua aplicação mas por terem algumas regras de aplicação e por vezes requererem algumas interpolações, podendo chegar a 16 no caso de pilares, tornam-se de igual modo demorados, além de serem métodos bastante conservativos. Os Métodos Tabelados podem ainda obrigar a modificar certos elementos estruturais do projeto para verificação da segurança ao fogo, podendo por vezes ser necessário recorrer-se aos métodos simplificados ou, em último caso, aos avançados, para verificar a segurança ao fogo.

Os Métodos Simplificados são menos conservativos que os Métodos Tabelados, mas a quantidade de dados necessários e o grau de complexidade de cálculo e de tempo necessário são muito mais elevados que aqueles.

Por outro lado, visto a regulamentação Portuguesa e a normalização europeia ser bastante recente, em que apenas um grupo muito pequeno de projetistas a conhece ou domina, torna o processo de aplicação daquela legislação ainda mais morosa e difícil pelos restantes projetistas de estruturas.

Assim, torna-se bastante vantajoso, do ponto de vista prático, dispor de ferramentas de cálculo automático para o cálculo de secções sobre o efeito do fogo. Deste modo facilita a aplicação e implementação das novas normas por parte do utilizador. Ao mesmo tempo estes modelos numéricos trazem grandes vantagens do ponto de vista de tempo gasto, quer no seu estudo quer na sua aplicação. Ao longo desta dissertação será abordada uma ferramenta de cálculo automático: o programa *SiFiRe* da autoria de Guimarães, [8], e coautoria de Gonçalves, [4].

3.5.2. SiFiRe

3.5.2.1. Desenvolvimento do programa

Os principais objetivos do programa de cálculo SiFiRe, acrónimo de “*Simplified Fire Resistance*”, além de permitir o cálculo estrutural segundo os métodos simplificados e tabelados, referidos no Capítulo 2, são o de tornar-se acessível a um grande número de utilizadores e ser de fácil utilização. Contudo, para que isso seja possível, é então essencial que o mesmo seja acessível através da internet e com um visual o mais intuitivo possível.

O interface foi desenvolvido em linguagem HTML e JavaScript por permitir uma boa e rápida ligação entre interface e programas, por assegurar as funcionalidades pretendidas e ainda por ser uma linguagem bastante utilizada permitindo assim uma futura continuidade de desenvolvimento do próprio programa, segundo Guimarães, [8].

No que concerne ao desenvolvimento dos programas de cálculo realizados pelo autor foi utilizada a linguagem de programação de alto nível Python, pois permite ter uma velocidade de cálculo bastante boa para o nível de complexidade dos algoritmos desenvolvidos.

Para a utilização do programa basta então ter um computador com ligação à internet e através de um Browser utilizar o programa.

3.5.2.2. Estrutura geral e funcionalidades

O programa com o nome de SiFiRe - Verificação da Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão, consiste num conjunto de 52 programas separados em 3 Métodos:

- Métodos Tabelados;
- Métodos Simplificados das Zonas;
- Métodos Simplificados da Isotérmica de 500°C.

Cada um destes Métodos foi dividido em sub-métodos em função da regulamentação, tipos de elementos e/ ou secções como se pode ver no Organigrama demonstrado na Figura 3.13.

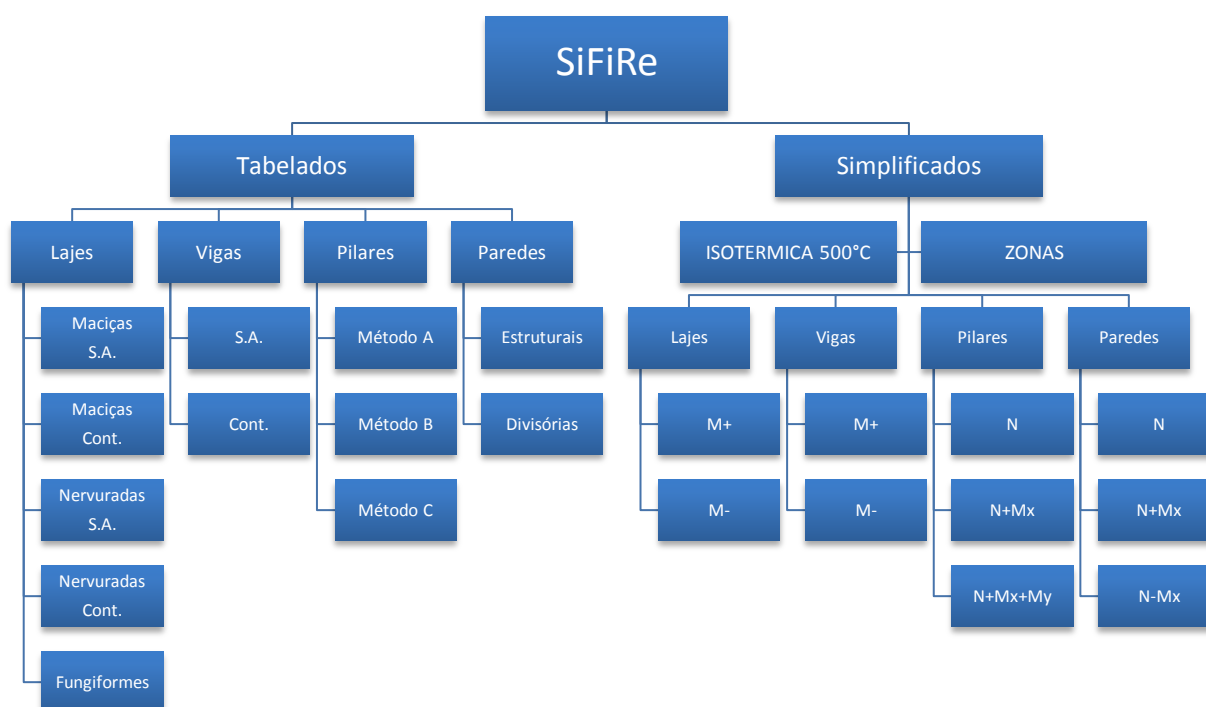


Fig. 3.13 - Organigrama representativo dos Métodos e sub-métodos de cálculo, [8].

Embora os Métodos Tabelados sejam bastante mais conservativos que os Simplificados optou-se por incluir os dois uma vez que, no caso dos primeiros, os dados necessários são em número inferior e mais fáceis de obter e, em caso da não verificação dos elementos estruturais à segurança ao fogo, poderá fazer-se o cálculo pelos Métodos Simplificados. Ter os dois métodos disponíveis, ainda que nos métodos simplificados se possa optar entre o método da Isotérmica dos 500°C e o método das Zonas, permite então que o utilizador tenha mais opções e que possa fazer uma análise comparativa entre métodos. O programa permite ainda fazer uma avaliação tanto para momentos positivos como para momentos negativos.

Todos os programas são baseados no princípio *introdução de dados e saída de resultados* sendo que em todos estes, a mensagem enviada pelo programa irá ser “OK”, “KO” ou “Não aplicável” sendo também apresentados os valores que justifiquem o resultado, distintos entre si de método para método.

Como referido anteriormente, o programa de cálculo automático SiFiRe permite a utilização de 3 diferentes métodos, como se pode visualizar no Menu Principal do mesmo, na Figura 3.14. No entanto, o presente trabalho apenas irá focar a parte dedicada a vigas.



Fig. 3.14 - Menu principal do Programa SiFiRe.

Em função do método que pretendemos utilizar, o SiFiRe vai gerar uma outra página que varia de método para método. Nas Figuras. 3.15, 3.16 e 3.18 estão representadas as páginas geradas pelo programa, quando se opta pela utilização do método das tabelas, o método da Isotérmica dos 500°C e o método das Zonas, respetivamente.

No caso de se optar pelo método das Tabelas, a página com que se depara é a apresentada na Figura 3.15 que, em comparação com os métodos simplificados (Figuras 3.16 e 3.18) exige menos dados a introduzir. Este método segue as regras do Capítulo 3, e no exemplo da figura abaixo, aplica o Quadro 3.6 para vigas contínuas. O que distingue, em termos de *introdução de dados*, na verificação de vigas simplesmente apoiadas das contínuas é ter em conta a redistribuição dos momentos fletores no segundo caso.

Fig. 3.15 - Menu do método das Tabelas com saída de resultados (SiFiRe).

Em que:

- Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE, [7], para a estrutura;
- a – distância do eixo das armaduras longitudinais à face;
- b – largura da secção;
- rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
- ϕ varões – diâmetro das armaduras e estribos.

Escolhendo o método da Isotérmica dos 500°C, a *introdução de dados* requer um maior número de valores, visível na Figura 3.16, em que a estimação de alguns deles, para além de exigir um maior dispêndio de tempo é passível de alguns erros, como é o caso da leitura das temperaturas nos varões e do fator a_{500} , pelos perfis de temperatura preconizados pelo Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

Fig. 3.16 – Menu método da Isotérmica dos 500°C – introdução de dados e saída de resultados (SiFiRe).

Como se pode verificar pela análise da Figura 3.16, alguns dos valores a introduzir são idênticos aos utilizados no caso do método anterior, sendo os restantes:

l – comprimento da viga ao laje;
 l_{inf} – largura de influência das ações a que o elemento está sujeito;
 Níveis de armadura – Nos níveis de armadura deverá considerar como na Figura 3.18.
 Nº varões – número de varões para cada nível, o tamanho da tabela de temperatura irá variar em função deste valor;
 a – distância da face da secção ao eixo da armadura que deverá ser calculado pela expressão (3.18) para cada Nível/Tipo de armadura;
 $Temp^{\circ}C$ – temperatura a que se encontra cada um dos varões da armadura de tração;
 a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C, Figura 3.9;
 $M_{rd,fi}$ – Momento resistente para a situação de incêndio;
 $M_{ed,fi}$ – Momento aplicada para situação de incêndio;
 x – posição do eixo neutro;
 Ext. inf. – extensão da armadura inferior;
 Ext. sup. – extensão da armadura superior;
 a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
 Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

Assim, o cálculo do parâmetro a será estimado pela expressão que se segue:

$$a = rec + \phi_{estrib} + \frac{\phi_{arm}}{2} \quad (3.28)$$

Em que:

rec - Recobrimento das armaduras;
 ϕ_{estrib} - Diâmetro dos estribos;
 ϕ_{arm} - Diâmetro da armadura.

Na Figura 3.17 é possível ver dois exemplos do tipo de armaduras que se devem introduzir no programa. No primeiro caso (Figura 3.17a) é apresentada uma secção com dois níveis de armadura de tração com o mesmo diâmetro em cada nível, enquanto o segundo (Figura 3.17b) é constituído apenas por um nível mas com dois diâmetros distintos de armadura.

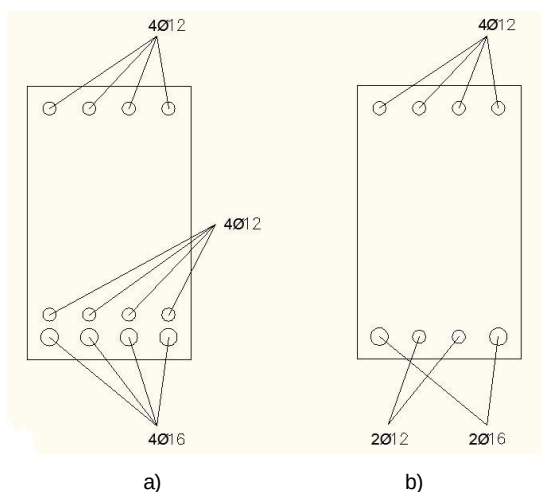


Fig. 3.17 - Exemplo de armaduras para Vigas, a) dois níveis; b) um nível.

A utilização do programa segundo o método das Zonas requer a *introdução de dados* semelhantes aos do método da Isotérmica dos 500°C com a variante de se ter de introduzir o número de zonas e as correspondentes temperaturas, como referido anteriormente neste Capítulo, dispensado, contudo, o parâmetro a_{500} . A Figura 3.18 mostra a página para *introdução de dados* e a consequente *saída de resultados* para o método das Zonas.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão Início | Exportar | Abrir Ajuda

Vigas M+

Métodos Simplificados

Zonas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo min

Geometria

b m

h m

rec mm

l m

l_{inf} m

Resistências

Classe Betão

Tipo de Aço

f_{ck} KPa

f_{yk} KPa

Armadura de Compressão

N° varões

Ø varões mm

Armadura de Tração

1º Nível

N° varões *

Ø varões mm

a mm

Varão	Temp. °C
1	500
2	450
3	450
4	500

2º Nível

N° varões *

Ø varões mm

a mm

Estribos

Ø mm

Cálculo de a_z

N° secções *

Temp. med °C

Varão	Temp. °C
1	700
2	550
3	380

Ações

q_k

ψ_{1,1}

Resultados

Resultados

$M_{ed,fi}$ kNm

$M_{ed,si}$ kNm

x m

Ext. inf. mm

Ext. sup. mm

a_s mm

Resultado

Fig. 3.18 - Menu método das Zonas – introdução de dados e saída de resultados (SiFiRe).

Em que:

- N° secções – Número de secções em que deve ser dividida metade da secção (mínimo 3 secções);
- Temp. med – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0m)}$);
- Temp °C – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0n)}$);
- a_z – largura de redução da secção da face.

Contudo, na utilização dos métodos Simplificados deve-se ter em atenção que se considera que a face superior dos elementos não está sujeita à ação do fogo (excetuando-se o disposto em 3.3.1.4 do presente capítulo).

As temperaturas a introduzir no programa deverão estar de acordo com os valores presentes nos Quadros de temperaturas do Anexo E.

4

ESTUDO DE CASO/ APRESENTAÇÃO DO PROJETO

4.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

Ao longo deste capítulo será feita a apresentação do projeto do edifício avaliado.

O edifício em estudo situa-se na cidade do Porto. O mesmo encontra-se dividido em três corpos com funcionamento estrutural independente. Foram assim adotadas duas juntas de dilatação dividindo a estrutura nos três corpos diferentes que foram designados por Edifício Nave, Edifício de Laboratórios e Edifício Torre.

O Edifício Nave apresenta uma geometria com dimensões máximas de $48.4 \times 31.75 \text{m}^2$, estando o piso inferior (Piso -1) em cave com dimensões máximas de $30.4 \times 31.75 \text{m}^2$. Existe ainda um piso térreo (Piso 0) que se estende a toda a área do edifício, um primeiro piso em parte da área de implantação e a cobertura desenvolvida também em toda a extensão do edifício.

O Edifício de Laboratórios, à semelhança do Edifício Nave, é constituído por três pisos estruturais, que apresentam uma geometria retangular em planta tendo como dimensões $48.2 \times 21.8 \text{m}^2$, estando o piso inferior (Piso -1) parcialmente em cave. Para além deste piso existe ainda um piso térreo, um primeiro piso e uma cobertura que se prolongam para as traseiras do edifício e uma cobertura elevada da zona central, também com geometria retangular, com $48.2 \times 21.8 \text{m}^2$ de área.

Em termos genéricos, o Edifício Torre apresenta uma geometria aproximadamente quadrangular de $18.0 \times 18.0 \text{m}^2$ de área, constituída por uma malha regular de pilares de $6.0 \times 6.0 \text{m}^2$, com um núcleo em betão armado de grande rigidez, constituído por uma caixa de elevadores, uma caixa de escadas e várias paredes adjacentes. Desenvolve-se em 10 pisos, sendo o piso -1 enterrado e contido perifericamente por um muro de suporte de terras. O piso 0 apresenta, em relação aos outros pisos, um vazio na laje derivado da colocação de uma laje de escadas que faz a ligação deste piso ao piso inferior. Em termos estruturais verifica-se uma grande similaridade dos elementos estruturais do piso 2 ao piso 8. A cobertura apresenta dimensões de aproximadamente $10.0 \times 14.0 \text{m}^2$ e eleva-se na zona na caixa de escadas.

A Figura 4.1 apresenta a planta geral do edifício para melhor e compreender a disposição no terreno dos três corpos que o compõem.

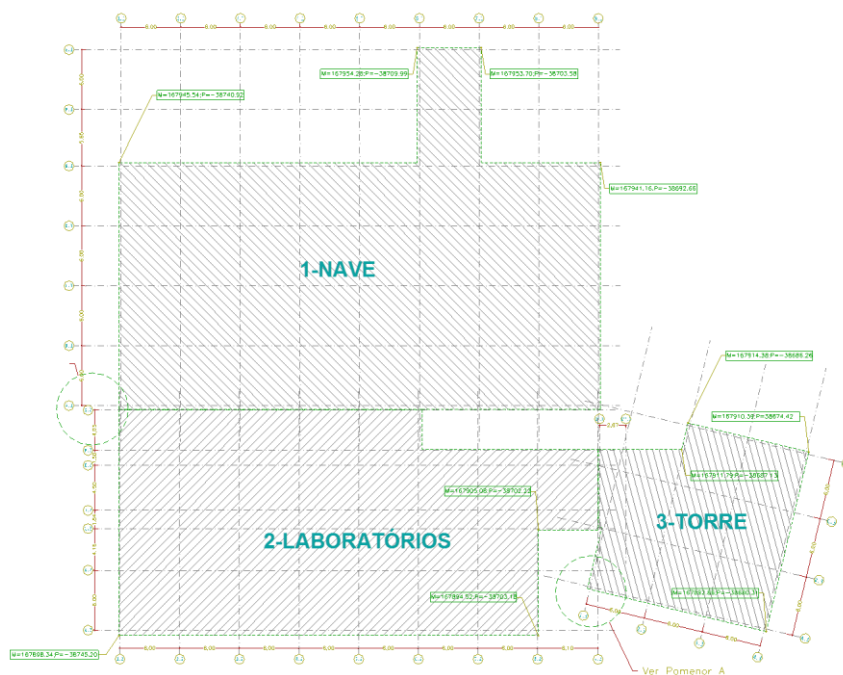


Fig. 4.1 - Planta do edifício.

Observando a Figura 4.1 percebe-se a posição das juntas de dilatação, referidas anteriormente, que separam os 3 corpos, uma vez que os seus eixos estão marcados com uma circunferência (a verde na figura).

Complementarmente apresenta-se a Figura 4.2 na qual é possível ter uma melhor percepção da posição dos 3 corpos que compõem o edifício e a ligação entre eles.

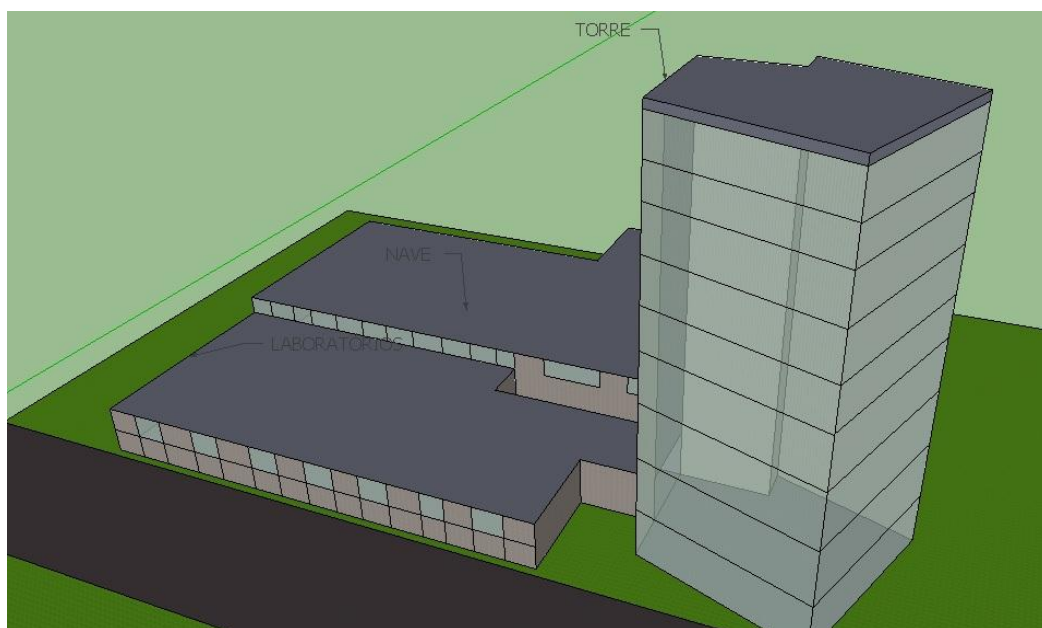


Fig. 4.2 - Esquema 3D do edifício.

As dimensões máximas da geometria do edifício, bem como o número de pisos, são apresentados, sucintamente, no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Áreas Brutas de projeto.

EDIFÍCIO	Cave	R/Chão	1º piso	2º piso	3º piso	4º piso	5º piso	6º piso	7º piso	8º piso
Torre	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²	324m ²
Nave	965.2m ²	1536.7m ²	965.2m ²	-	-	-	-	-	-	-
Laboratórios	1795.0m ²	1050.76m ²	1050.76m ²	-	-	-	-	-	-	-

4.2. MATERIAIS

O material estrutural utilizado neste projeto é o betão armado e o aço.

Nas fundações e elementos estruturais em contacto com o solo, o betão a utilizado é de classe C25/30, segundo o EC2 parte 1-1, [11]. Nos restantes elementos estruturais, o betão é também de classe C25/30. Os varões de aço são da classe A500-NR, enquanto a malhasol da classe A500-EL.

Na estrutura metálica, os materiais a utilizados são o aço S275JR nos perfis em geral e em chapas. Os parafusos são da classe 8.8 e os chumbadouros executados em varão roscado da classe A500-NR.

Os perfis metálicos receberam proteção necessária contra a corrosão.

4.3. AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Tratando-se de um edifício existente procedeu-se apenas a uma verificação da segurança à ação do fogo dado que se considera que todos os elementos foram analisados e dimensionados tendo como base a Regulamentação Nacional ou Europeia em vigor.

A conceção estrutural e o estudo dos elementos estruturais tiveram por base as ações e respetivas combinações que constam da regulamentação portuguesa (EC2 parte 1-1, [11]). Para além do peso próprio dos elementos estruturais, das paredes, dos painéis de enchimento e dos materiais de revestimento, foram consideradas as sobrecargas de utilização atendendo à função do espaço e ao equipamento a instalar. Assim, seguem-se no Quadro 4.2 os valores máximos correspondentes às ações definidas.

Quadro 4.2 - Ações a considerar nos 3 corpos do edifício.

EDIFÍCIO TORRE			EDIFÍCIO NAVE			EDIFÍCIO LABORATÓRIOS		
Pisos-1 a 8	Revestimentos	1.5 kN/m ²	Piso-1 e 0	Revestimentos	1.5 kN/m ²	Piso-1 e 0	Revestimentos	1.5 kN/m ²
	Divisórias	1.5 kN/m ²		Divisórias	1.5 kN/m ²		Divisórias	1.5 kN/m ²
	Sobrecarga	4.0 kN/m ²		Sobrecarga	10.0 kN/m ²		Sobrecarga	10.0 kN/m ²
Piso 8	Revestimentos	2.0 kN/m ²	Piso 1	Revestimentos	1.5 kN/m ²	Piso 1	Revestimentos	1.5 kN/m ²
	Divisórias	-		Divisórias	1.5 kN/m ²		Divisórias	1.5 kN/m ²
	Sobrecarga	10.0 kN/m ²		Sobrecarga	10.0 kN/m ²		Sobrecarga	10.0 kN/m ²
Cobertura	Revestimentos	2.0 kN/m ²	Cobertura	Revestimentos	3.6 kN/m ²	Cobertura	Revestimentos	4.1 kN/m ²
	Sobrecarga	2.0 kN/m ²		Sobrecarga	1.0 kN/m ²		Sobrecarga	1.0 kN/m ²

Em relação às combinações de ações, foram consideradas as combinações fundamentais, as combinações acidentais e as combinações com vista à verificação aos estados limites de utilização. São ainda consideradas as hipóteses mais desfavoráveis de disposição em alternância das ações variáveis.

Os esforços de dimensionamento foram obtidos procedendo a uma combinação global envolvendo as ações, considerando as seguintes regras de combinação:

Em geral:

$$E_{d, fi} = \sum \gamma_G G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.1)$$

Em que:

- G_k – Valor característico das ações permanentes;
- $\psi_{1,1}$ – Coeficiente de combinação;
- ψ_2 – Coeficiente de combinação;
- $Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável principal;
- $Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes ações variáveis;
- γ_G – Coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes.

No caso de a ação variável base ser a ação sísmica:

$$E_{d, fi} = \sum \gamma_G G_k + A_{Fa} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4.2)$$

Em que:

- G_k – Valor característico das ações permanentes
- ψ_2 – Coeficiente de combinação
- $Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável principal
- $Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes ações variáveis
- A_{Fa} – Valor de cálculo da ação acidental, neste caso, representa o valor de cálculo da ação sísmica
- γ_G – Coeficiente parcial de segurança para as ações permanentes

4.4. CONCEÇÃO ESTRUTURAL

Nos edifícios Nave e Laboratórios, a estrutura na sua generalidade, será constituída por lajes fungiformes maciças com 0.30m de espessura, apoiadas diretamente em pilares, paredes e vigas. As lajes formam painéis de cerca de 6.0x6.0m², estando sujeitas às cargas uniformemente distribuídas equivalentes às ações verticais permanentes e variáveis. Na laje do Piso 0 do Edifício Nave, foi considerada uma carga pontual adicional de 75kN, equivalente à ação de um empilhador.

A cobertura do Edifício Nave é constituída por uma grelha de perfis metálicos, que apoiam nos pilares de betão armado do edifício. O pavimento da cobertura é realizado com uma laje de cofragem de aço

perdida, que apoia em vigas secundárias (IPE 300), que por sua vez se apoiam nas vigas principais (HEB 600). As vigas secundárias encontram-se contraventadas com perfis IPE 120.

A cobertura do Edifício de Laboratórios é constituída por uma laje com 0.20 m de espessura.

Os pilares formam, tal como foi anteriormente referido, uma malha de cerca de $6.0 \times 6.0 \text{ m}^2$ tendo sido dimensionados para resistirem não só às ações provenientes das lajes mas também às ações horizontais (vento e sismo). Convém também referir que as secções dos pilares foram também condicionadas pelos esforços de punçoamento não podendo por este motivo existir pilares com secções muito reduzidas.

As paredes exteriores de betão armado, tal como as caixas de escadas e de elevadores, têm uma espessura de 0.20m.

Dado que o Edifício de Laboratórios apresenta o centro de rigidez deslocado do centro geométrico devido à existência de um núcleo de grande rigidez num dos extremos, este vai ser bastante sensível aos efeitos de retração e variação de temperatura, não se justificando, no entanto, o uso de qualquer junta de dilatação dado que os limites regulamentares de espaçamento de juntas são excedidos por pouco. A estrutura do Edifício Torre é formada por lajes fungiformes aligeiradas (0.30m de espessura) que se apoiam diretamente nos pilares, nas vigas periféricas e nas paredes estruturais. Nas zonas de inserção dos pilares com as paredes, as lajes apresentam zonas maciças.

As paredes exteriores de betão armado, tal como as caixas de escadas e de elevadores, têm espessuras de 0.20m e 0.25m respetivamente.

4.5. VERIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO SEGUNDO OS REGULAMENTOS NACIONAIS RT-SCIE E RJ-SCIE - CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DOS CORPOS DO EDIFÍCIO

4.5.1. INTRODUÇÃO

Com vista a melhorar o desempenho do edifício em caso de incêndio é necessário fazer uma verificação do mesmo tendo por base os regulamentos nacionais RJ-SCIE, [6] e RT-SCIE, [7], como foi referido no ponto 2.2 do Capítulo 2 deste trabalho.

Assim, nesta secção apresentam-se os cálculos efetuados de acordo com os regulamentos nacionais referidos no parágrafo anterior com o objetivo de classificar os corpos do edifício quanto à sua resistência ao fogo.

Sendo o edifício em estudo constituído por diferentes corpos com utilizações tipo distintas é necessário efetuar a avaliação dos principais fatores para a atribuição das diferentes categorias de risco.

4.5.2. LABORATÓRIOS

O edifício denominado *Laboratórios* ao abrigo do RJ-SCIE, [6], tem diferentes tipos de ocupação tais como laboratórios, gabinetes e serviços administrativos, a que correspondem diferentes Utilizações Tipo (UT). No entanto, a regulamentação nacional, estabelece que se torna necessário verificar os diversos fatores, referidos no parágrafo 2.2 do Capítulo 2, com vista a conhecer qual a utilização mais condicionante.

4.5.2.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo

O tipo de ocupação do edifício é estabelecido recorrendo ao DL 220/2008 - Art.º 8.º n.º 3, [6]. Assim, de acordo com as diversas ocupações classificam-se em:

- UT XII – Industriais, oficinas e armazéns;
- UT IV - Escolares;
- UT III – Administrativos.

Conclui-se então que o edifício é de **utilização mista**.

Como estamos perante um edifício de utilização mista irão ser agora avaliados os fatores requeridos de todas as utilizações tipo presentes.

4.5.2.2. Análise do efetivo

Posteriormente, na definição da categoria de risco para as diversas ocupações, torna-se perentório fazer uma análise do seu efetivo. São apresentados de seguida os cálculos efetuados ao abrigo da Portaria n.º 1532/2008, Art.º 51.º, [7] para as diversas UT.

Para a ocupação escolar – **UT IV**:

- Piso -1 - Arrumos e arquivos – $54,4\text{m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 2$;
Entrada de serviço – $48,6\text{m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 5$;
Laboratórios – $371,5\text{m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 75$;
Refeitório – $36,5\text{m}^2 \times 1,00 \text{ p/m}^2 = 37$;

Efetivo =119.

- Piso 0 - Laboratórios – $368,8\text{m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 74$;
Sala de bolseiros – $18,5 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 2$;

Efetivo =76

- Piso 1 - Gabinetes – $294,5 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 30$;
Open space (zona administrativa) – $248,0\text{m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 50$;
Salas de reuniões – $23,0 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 12$;

Efetivo =92.

Pelos cálculos apresentados o total do efetivo da UT IV é de 287, resultante da soma dos valores do efetivo em cada piso (119+76+92=287).

Para a ocupação administrativos – **UT III**:

- Piso 1 - *Open space* (zona administrativa) – $248,0\text{m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 50$

Efetivo =50

Para a UT III o efetivo calculado é de **50** pessoas.

4.5.2.3. Cálculo da densidade de carga modificada

Um outro fator requerido na definição da Categoria de Risco de um edifício é a densidade de carga modificada, q , para UT XII – industrial e oficinas.

O Despacho nº 2074/2009, [18], estabelece que a densidade de carga de incêndio modificada, (q_s), afeto a cada compartimento da utilização tipo XII, exceto armazenamento, é calculada pela expressão 5.3. Na necessidade de se calcular a carga de incêndio modificada (q) na totalidade dos compartimentos corta-fogo da utilização tipo XII utilizar-se-á a expressão 5.4.

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{Na} q_{si} \times S_i \times C_i \times R_{ai}}{\sum_{i=1}^{Na} S_i} \quad (4.3)$$

em que: - q_{si} = densidade de carga de incêndio relativa ao tipo de atividade (i); [MJ/m²]
 - S_i = área afeta à zona de atividade (i); [m²]
 - C_i = coeficiente adimensional de combustibilidade do constituinte combustível de maior risco de combustibilidade presente na zona de atividade (i);
 - R_{ai} - coeficiente adimensional de ativação do constituinte combustível do tipo de atividade da zona (i);
 - Na - número de zonas de atividades distintas.

No presente caso vem:

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{Na} q_{si} \times S_i \times C_i \times R_{ai}}{\sum_{i=1}^{Na} S_i} = \frac{21945,0 \times 20,9 + 288000,0 \times 30,0 + 15000,0 \times 37,5 + 11520 \times 9,6 + 167232,0 \times 26,8 + 9940,0 \times 49,7 + 3960,0 \times 19,8 + 7420,0 \times 37,1 + 31620,0 \times 52,7 + 189660,0 \times 316,1}{20,9 + 30,0 + 37,5 + 9,6 + 26,8 + 49,7 + 19,8 + 37,1 + 52,7 + 316,1}$$

$$q_s = 1271,12 \text{ MJ/m}^2$$

Densidade de carga de incêndio modificada da totalidade desta utilização-tipo:

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} q_{sk} \times S_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_a} S_k} \quad (4.4)$$

em que : - q_{sk} - densidade de carga de incêndio modificada de cada compartimento corta -fogo (k) [MJ/m²];

- S_k - área útil de cada compartimento corta -fogo (k) [m²];

- N - número de compartimentos corta -fogo.

4.5.2.4. Definição da categoria de risco

Nos quadros que se seguem, Quadro 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados resumidamente os valores dos fatores necessários para a definição da categoria de risco correspondentes a cada UT do corpo do edifício, comparando-os com os limites fixados pelo RJ-SCIE, [7] e RT-SCIE, [8].

Quadro 4.3 - Categoria de risco para Utilização tipo IV segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro IV, [6].

Fatores de risco	Altura da UT IV	4,1m ≤ 9m	2. ^a Categoria de risco
	Efetivo da UT IV	287 ≤ 500x1,5=750	
	Efetivo da UT IV em locais de risco D ou E	0 ≤ 25	

Com base no Quadro 4.3 pode-se definir a **2.^a Categoria de Risco** para a UT IV dado que cumpre os limites especificados no regulamento para *Altura da UT IV*, *Efetivo da UT IV* e *Efetivo da UT IV em locais de risco D ou E*.

Quadro 4.4 - Categoria de risco para Utilização tipo III segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro III, [6].

Fatores de risco	Altura da UT III	4,1m ≤ 9m	1. ^a Categoria de risco
	Efetivo da UT III	50 ≤ 100	

Segundo o Quadro 5.4 pode-se definir a **1.^a Categoria de Risco** para a ocupação administrativos (UT III) dado que tanto a altura e o efetivo da UT fica abaixo dos limites fixados pelos regulamentos.

Quadro 4.5 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].

Fatores de risco	Carga de incêndio modificada da UT XII	2. ^a Categoria de risco
	1271,12 MJ/m ² ≤ 5000 MJ/m ²	
	nº de pisos ocupados pela UT XII abaixo do plano de referência	
	1 ≤ 1	

Pela análise do Quadro 4.5 conclui-se que a para a UT XII é atribuída a **2.^a Categoria de Risco**.

Com base na análise efetuada aos quadros acima referidos e tendo em conta o disposto no DL 220/2008 - Art.º13.º - n.º 5, [6], “Os edifícios e os recintos de utilização mista são classificados na categoria de risco mais elevada das respetivas utilizações-tipo, independentemente da área ocupada por cada uma dessas utilizações”, atribui-se ao corpo *Laboratórios* a **2ª Categoria de risco**.

4.5.2.5. Conclusões

Conhecendo-se as utilização-tipo e a correspondente categoria de risco poderá agora definir-se a resistência padrão mínima a que cada utilização tipo terá de obedecer (pela Portaria n.º 1532/2008, [7]) tal como referido no ponto 2.2 do Capítulo 2 desta tese, as quais são apresentadas, de modo sucinto, no Quadro 5.6 referentes às condições exteriores comuns, às condições de comportamento ao fogo, isolamento e proteção, às condições de evacuação, às condições das instalações técnicas, às condições dos equipamentos e sistemas de segurança bem como às condições de autoproteção.

Quadro 4.6 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, Quadro IX, [7].

UT IV - Escolares 2ª categoria de risco	R60
UT III - Administrativos 1ª categoria de risco	R30
UT XII - Industriais, oficinas e armazéns 2ª categoria de risco	R90

Uma vez que nos três pisos existem espaços destinados a laboratórios e às restantes utilizações, não se encontrados alinhados em altura, por tipo de ocupação, deverá ser considerada a resistência ao fogo **R90** em toda a estrutura do edifício, por ser a mais condicionante.

4.5.3. TORRE

O corpo Torre tem, tal como o corpo Laboratórios, diversas ocupações tais como serviços administrativos, gabinetes, zonas de exposições e no piso 8 laboratórios, pelo que se vai proceder a uma análise semelhante á efetuada na secção 4.5.2.1.

4.5.3.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo

Recorrendo à consulta do DL 220/2008 - Art.º 8.º n.º 3, [6], vem:

- UT IV - Escolares;
- UT XII – Industriais, oficinas e armazéns.

Conclui-se então que o edifício é também de **utilização mista**.

Seguidamente irão ser analisados os fatores que influenciam a definição da categoria de risco e consequente resistência ao fogo.

4.5.3.2. Análise do efetivo

Para as diversas utilizações tipo apresentam-se agora os cálculos efetuados ao abrigo da Portaria n.º 1532/2008, Art.º51.º, [7] na definição do seu efetivo.

Para a ocupação Escolares – **UT IV**:

- Piso -1
 - Sala polivalente – $158,1 \text{ m}^2 \times 3,00 \text{ p/m}^2 = 475$
 - Gabinete – $21,0 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 3$

Efetivo = 478
- Piso 0
 - Área de exposições - $140,2 \text{ m}^2 \times 0,35 \text{ p/m}^2 = 50$
 - Gabinetes de apoio – $27,4 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 3$
 - Efetivo = 53
- Piso 1
 - Bar e zona de jogos – $186,3 \text{ m}^2 \times 2,00 \text{ p/m}^2 = 373$
 - Átrio – $32,5 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 17$

Efetivo = 390
- Piso 2
 - Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$
 - Arrumos – $4,0 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 1$
 - Gabinetes – $78,0 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 8$
 - Open space (computadores e operadores) – $158,2 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 32$

Efetivo = 51
- Piso 3 e Piso 7
 - Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$
 - Arrumos – $4,0 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 1$
 - Gabinetes – $53,3 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 6$
 - Open space (computadores e operadores) – $158,2 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 32$
 - Sala de reuniões – $24,7 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 13$

Efetivo = $2 \times 62 = 124$
- Piso 4
 - Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$
 - Arrumos – $4,0 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 1$
 - Gabinetes – $53,3 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 6$
 - Serviços administrativos – $114,7 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 23$
 - Arquivo documental – $43,5 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 2$
 - Sala de reuniões – $24,7 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 13$

Efetivo = 55
- Piso 5
 - Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$
 - Arrumos – $4,0 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 1$
 - Gabinetes – $117,1 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 12$
 - Secretaria – $39,8 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 8$

Sala de reuniões – $79,3 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 40$

Efetivo = 71

▪ Piso 6

Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$

Arquivo – $26,3 \text{ m}^2 \times 0,03 \text{ p/m}^2 = 1$

Gabinetes – $36,9 \text{ m}^2 \times 0,10 \text{ p/m}^2 = 4$

Serviços administrativos – $177,0 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 36$

Efetivo = 51

Pelos cálculos apresentados o total do efetivo da UT IV é de **1332** pessoas resultante da soma dos efetivos de todos os pisos acima descritos.

Para a ocupação Industriais, oficinas e armazéns – **UT XII**:

▪ Piso 8

Átrio – $18,4 \text{ m}^2 \times 0,50 \text{ p/m}^2 = 10$

Laboratórios – $240,2 \text{ m}^2 \times 0,20 \text{ p/m}^2 = 49$

Efetivo = 59

4.5.3.3. Cálculo da densidade de carga modificada

No presente caso recorre-se às expressões 5.3 e 5.4 referidas no parágrafo 5.5.2.3, para avaliar a densidade de carga modificada afeta á UT XII, onde vem:

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{Na} q_{si} \times S_i \times C_i \times R_{ai}}{\sum_{i=1}^{Na} S_i} = 200 \text{ MJ/m}^2, \text{ recorrendo à expressão 4.3 e,}$$

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{Na} q_{sk} \times S_{ki}}{\sum_{i=1}^{Na} S_k} = 20,43 \text{ MJ/m}^2, \text{ com a expressão 4.4.}$$

4.5.3.4. Definição da categoria de risco

Nos Quadros 4.7 e 4.8 estão representados, sucintamente, os valores dos fatores que vão definir a categoria de risco correspondente a cada UT do corpo do edifício, uma vez mais, tendo por base os limites fixados pelo RJ-SCIE, [6] e RT-SCIE, [7].

Quadro 4.7 - Categoria de risco para Utilização tipo III segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro III, [6]

Fatores de risco	Altura da UT IV $28,22 \text{ m} \leq 50 \text{ m}$	3. ^a Categoria de risco
	Efetivo da UT IV $1332 \leq 5000$	

Define-se assim, com base no Quadro 4.7, para a UT III do corpo do edifício em análise a **3ª Categoria de risco**.

Quadro 4.8 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].

Fatores de risco	Carga de incêndio modificada da UT XII $20,43 \text{ MJ/m}^2 \leq 500 \text{ MJ/m}^2$	1. ^a Categoria de risco
	nº de pisos ocupados pela UT XII abaixo do plano de referência $0 \leq 0$	

Pelo Quadro 4.8 admite-se a **1ª Categoria de risco** para a UT XII.

Deste modo, e obedecendo ao disposto no DL 220/2008 - Art.º13.º - n.º 5, [7], para edifícios e recintos de utilização mista, são classificados na categoria de risco mais elevada das respetivas UT, independentemente da área ocupada por cada uma delas admite-se então que o corpo Torre do edifício encontra-se na **3ª Categoria de risco**.

4.5.3.5. Conclusões

A análise feita nos parágrafos anteriores e as suas conseqüentes conclusões encontram-se resumidas no Quadro 4.9 através do qual se procura conhecer a resistência ao fogo do corpo Torre.

Quadro 4.9 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, [7].

UT III - Administrativos 3ª categoria de risco	R90
UT XII - Industriais, oficinas e armazéns 1ª categoria de risco	R60

Considera-se para este edifício uma resistência ao fogo **R90** em todos os pisos.

4.5.4. NAVE

O corpo Nave, compreende apenas um tipo de ocupação pelo que a análise não comportará algumas verificações, verificadas nos dois outros corpos que compreendem o edifício em estudo, como se verá de seguida.

4.5.4.1. Tipo de ocupação – Utilização tipo

Como referido anteriormente, o edifício Nave apenas compreende um tipo de ocupação, Laboratórios, pelo que, apenas se atribui a **UT XII – Industriais, oficinas e armazéns**.

4.5.4.2. Cálculo da densidade de carga modificada

Através da expressão 5.4 foi calculada a densidade de carga de incêndio modificada (q) da totalidade desta utilização tipo (UT XII) onde,

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_a} q_{sk} \times S_{ki}}{\sum_{i=1}^{N_a} S_{ki}} = q_s = \frac{1422,95 \times 126,50 + 6525,19 \times 15,10 + 200,00 \times 337,90 + 462,40 \times 1353,80 + 3189,98 \times 142,4 + 1950,00 \times 129,4}{126,50 + 15,10 + 337,90 + 1353,80 + 142,4 + 129,4} = 797,44 \text{ MJ/m}^2.$$

4.5.4.3. Definição da Categoria de risco

Na definição da categoria de risco da UT XII apenas se tem em consideração, pelo DL 220/2008, [6], a carga de incêndio modificada da UT e o número de pisos abaixo do plano de referência, em conformidade com o referido no Quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Categoria de risco para Utilização tipo XII segundo o DL 220/2008, Anexo III, Quadro X, [6].

Fatores de risco	Carga de incêndio modificada da UT XII $797,44 \text{ MJ/m}^2 \leq 5000 \text{ MJ/m}^2$	2. ^a Categoria de risco
	nº de pisos ocupados pela UT XII abaixo do plano de referência $1 \leq 1$	

Atribui-se assim à UT XII a **2ª Categoria de risco**.

4.5.4.4. Conclusões

Na sequência de verificações efetuadas anteriormente, aparece resumida, no Quadro 5.11, a informação que daí advém.

Quadro 4.11 - Resistência padrão mínima a que corresponde cada utilização tipo pela Portaria n.º 1532/2008, Quadro IX, [7].

UT XII – Industriais, oficinas e armazéns 2ª categoria de risco	R90
--	-----

Em todo o corpo Nave se admite uma Resistência ao fogo **R90**.

4.5.5. CONCLUSÕES GERAIS

Apresentam-se resumidas no Quadro 4.12 as utilizações tipo com as respetivas categorias de risco bem como a correspondente Resistência ao Fogo, dos três corpos que compõe o edifício em estudo.

Quadro 4.12 - Utilizações Tipo (UT), Categorias de risco e classe de Resistência ao Fogo.

EDIFÍCIO TORRE			EDIFÍCIO NAVE			EDIFÍCIO LABORATÓRIOS		
Pisos-1 a 7	UT	III e IV	Piso -1 e 0	UT	XII	Piso -1 e 0	UT	IV e XII
	Categorias de risco	3º		Categorias de risco	2ª		Categorias de risco	2ª
	Resistência ao fogo	R90		Resistência ao fogo	R90		Resistência ao fogo	R90
Piso 8	UT	XII	Piso 1	UT	XII	Piso 1	UT	III
	Categorias de risco	1ª		Categorias de risco	2ª		Categorias de risco	1ª
	Resistência ao fogo	R60		Resistência ao fogo	R90		Resistência ao fogo	R90

A análise efetuada neste capítulo teve como principal objetivo, o de conhecer as classes de Resistência ao fogo de todos corpos do edifício uma vez que se trata de um dado necessário na avaliação que se pretende efetuar das vigas do mesmo, recorrendo-se aos métodos Tabelado e Simplificados do Eurocódigo 2, parte 1-2, [1].

4.6. DESCRIÇÃO DAS VIGAS A SEREM AVALIADAS NO CAPÍTULO 5

No Capítulo 6 irão analisar-se as vigas do edifício apresentado pelo que, nesta secção, se procura fazer a descrição dessas mesmas vigas. Por uma questão de espaço, e visto que em análise irão estar 114 vigas, apenas vão constar 3 vigas (a título de exemplo) cada uma pertencendo a um dos corpos do edifício, Laboratórios, Torre e Nave.

4.6.1. APRESENTAÇÃO DAS VIGAS

As vigas a constar, como exemplo, no Capítulo 6 serão:

- Viga VF1.1 – Laboratórios;
- Viga V5C.1 – Nave;
- Viga V1A.8 – Torre.

Em seguida vão ser apresentadas a configuração geométrica e propriedades das vigas analisadas.

4.6.1.1. Viga VF1.1 - Laboratórios

A viga VF1.1 encontra-se no piso 1 do corpo Laboratórios cuja posição se pode ver na Figura 4.3 a traço vermelho.

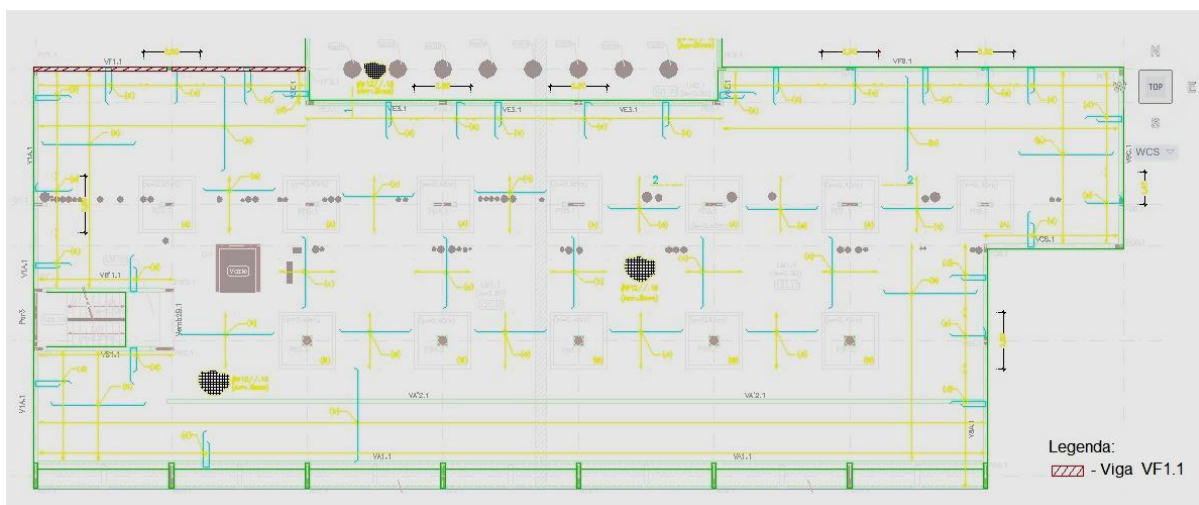


Fig. 4.3 - Planta estrutural piso 1 do edifício Laboratórios.

As características geométricas e propriedades materiais da viga constam no Quadro 4.13.

Quadro 4.13 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga VF1.1.

Secção transversal	Vão (m)	h (m)	b (m)	Armadura Superior (ϕ varões em mm)	Armadura Inferior (ϕ varões em mm)	Estribos (ϕ varões em mm)	Propriedades materiais	
							Betão f_{cd} (MPa)	Aço f_{sy} (MPa)
VF1.1	6	1	0,2	2 ϕ 16	5 ϕ 16+2 ϕ 12	ϕ 8//0,20	C25/30	A500

Para uma melhor compreensão da posição das armaduras e características geométricas da viga, a Figura 4.4 representa a secção transversal da viga VF1.1.

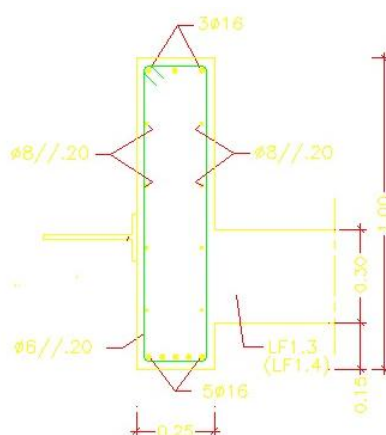


Fig. 4.4 - Secção transversal da viga VF1.1.

4.6.1.2. Viga VC5.1 - Nave

Neste parágrafo são apresentadas as propriedades geométricas e materiais da viga VC5.1, que se encontra no piso 1 do edifício Nave, como mostra a Figura 4.5 (viga a traço vermelho).

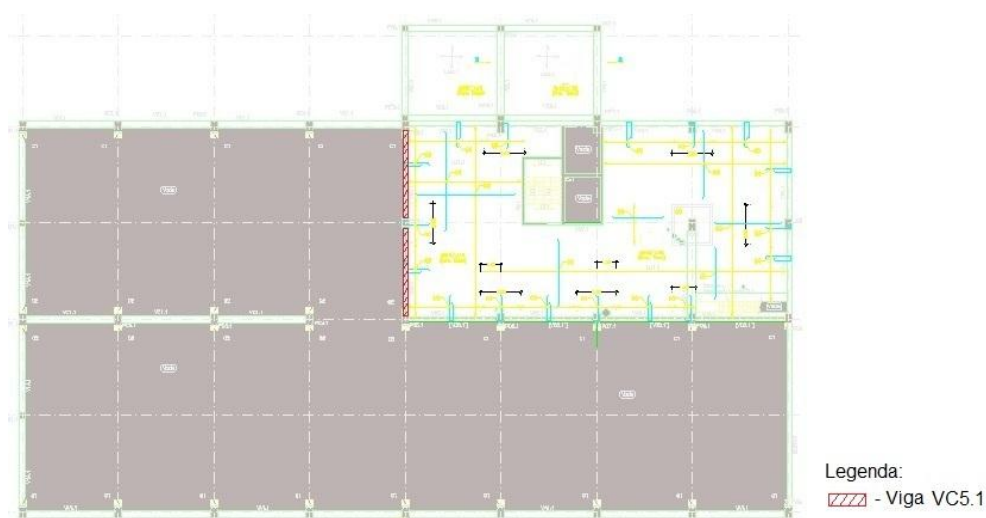


Fig. 4.5 - Planta estrutural piso 1 do edifício Nave.

No quadro seguinte, Quadro 4.14, estão as características referidas anteriormente.

Quadro 4.14 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga V5C.1.

Secção transversal	Vão (m)	h (m)	b (m)	Armadura Superior (ϕ varões em mm)	Armadura Inferior (ϕ varões em mm)	Estribos (ϕ varões em mm)	Propriedades materiais	
							Betão f_{cd} (MPa)	Aço f_{sy} (MPa)
VC5.1	6	1,2	0,3	2 ϕ 12+3 ϕ 16	5 ϕ 16	ϕ 8//0,15	C25/30	A500

A Figura 4.6 representa a secção transversal para melhor se perceber a sua geometria e disposição das armaduras.

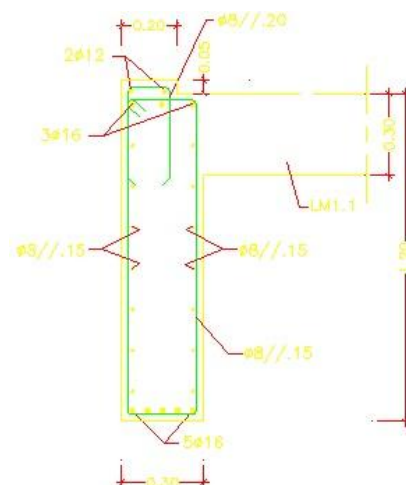


Fig. 4.6 - Secção transversal da viga VC52.1.

4.6.1.3. Viga V1A.8 - Torre

No caso do corpo Torre, optou-se por se colocar em exemplo uma viga do piso 8, em que a resistência ao fogo é R90. A posição da viga V1A.8 está referenciada na Figura 4.7, a traço vermelho, para melhor se perceber a sua interação com a estrutura envolvente.



Fig. 4.7 - Planta estrutural piso 1 do edifício Torre.

De seguida, no Quadro 4.15, são referidas as características materiais e geométricas da viga em questão.

Quadro 4.15 - Parâmetros geométricos e propriedades materiais da viga V1A.8.

Secção transversal	Vão (m)	h (m)	b (m)	Armadura Superior (ϕ varões em mm)	Armadura Inferior (ϕ varões em mm)	Estribos (ϕ varões em mm)	Propriedades materiais	
							Betão f_{cd} (MPa)	Aço f_{sy} (MPa)
V1A.8	6	1,0	0,25	3 ϕ 16	5 ϕ 16	ϕ 8//0,20	C25/30	A500

Apresenta-se na Figura 4.8 a secção da viga V1A.8 onde se pode ver, com pormenor, as características geométricas que estão representadas no Quadro 4.15.

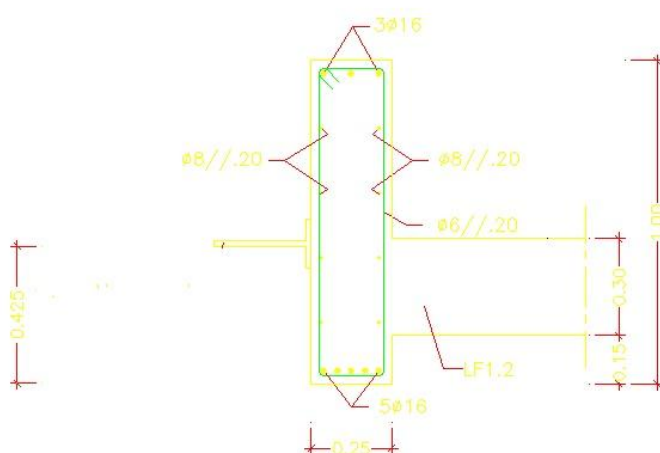


Fig. 4.8 - Secção transversal da viga V1A.8.

5

APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO SiFiRe NA AVALIAÇÃO DAS VIGAS DE UM PROJECTO

5.1. INTRODUÇÃO

No decorrer deste capítulo é feita a análise das vigas do edifício apresentado no Capítulo 4, recorrendo ao projeto de estruturas do mesmo, utilizando o programa de cálculo automático SiFiRe.

Assim, serão então apresentados três exemplos da verificação da capacidade resistente de 3 vigas do edifício, expostas a incêndio, usando o programa SiFiRe. Os valores resultantes da verificação das restantes vigas do edifício foram remetidos para o Anexo E. No total foram analisadas 114 vigas que por sua vez se dividem num total de 262 tramos.

Assim os exemplos que serão apresentados neste capítulo dizem respeito às vigas referidas no parágrafo 4.6 do Capítulo 4, vigas VF1.1, V5C.1 e V1A.8 que pertencem, respetivamente, aos corpos Laboratórios, Nave e Torre. A avaliação da capacidade resistente é feita com base nos métodos que constam no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], métodos Tabelados e Simplificados, da Isotérmica dos 500°C e das Zonas.

Serão ainda apresentados alguns valores intermédios que não são mostrados na saída de resultados do programa SiFiRe relativos á viga VF1.1.

O programa está preparado para fazer o cálculo das resistências à temperatura ambiente e obter as ações em incêndio. Desta forma considera-se que as ações a temperatura ambiente e em situação de incêndio estão sempre a solicitar a secção para o esforço resistente máximo.

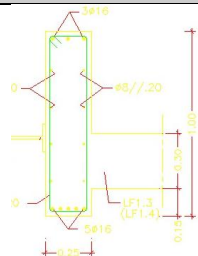
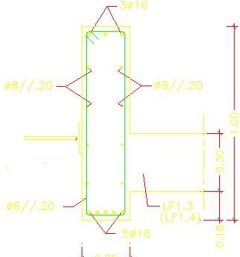
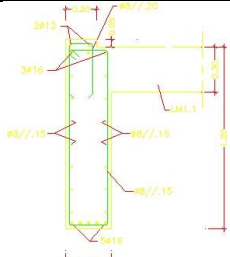
5.2. VERIFICAÇÃO DAS VIGAS VF1.1, V5C.1 E V1A.8

5.2.1. INTRODUÇÃO

Neste parágrafo irá proceder-se à verificação das vigas em exemplo onde se poderá ver, através de figuras a página de *introdução de dados* e de *saída de resultados* de cada um desses exemplos.

De forma a resumir as características das vigas a analisar e para uma melhor contextualização das verificações que vão ser apresentadas ao longo do capítulo, é apresentado no Quadro 5.1 um resumo das secções e características geométricas e materiais das vigas.

Quadro 5.1 - Parâmetros geométricos das secções das vigas analisadas com os métodos Tabelado, da Isotérmica dos 500°C e das Zonas (SiFiRe) e propriedades materiais (dimensões da secção de betão em [m] e diâmetros dos varões em [mm]).

Secção transversal	Propriedades Geométricas e Armaduras	Propriedades materiais	
VF1.1		Betão f_{cd} (MPa)	Aço f_{sy} (MPa)
	0,2x1,0 Armadura superior: 2φ16 Armadura inferior: 5φ16+2φ12 Estribos: φ8//0,20	C 25/30	A500
VC5.1			
	0,3x1,2 Armadura superior: 2φ12+3φ16 Armadura inferior: 5φ16 Estribos: φ8//0,15	C 25/30	A500
V1A.8			
	0,25x1,0 Armadura superior: 3φ16 Armadura inferior: 5φ16 Estribos: φ8//0,20	C 25/30	A500

5.2.2. CÁLCULO DE TEMPERATURAS E COEFICIENTES REDUTORES

No cálculo de secções de estruturas de betão armado, quando expostas a uma situação de incêndio, é necessário ter em conta os coeficientes redutores que induzem à redução do valor característico da resistência dos materiais, como foi referido anteriormente no parágrafo 3.2.3 e 3.2.4 do Capítulo 3.

Para o método Tabelado, o Eurocódigo 2, Parte 1-2, [1], fornece as expressões que dão origem às curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado, curva essa representada na Figura 3.4 do Capítulo 3, das quais se podem calcular os coeficientes redutores para as armaduras. Existem também curvas semelhantes para o caso de secções de betão. No caso das temperaturas estas provêm da leitura dos perfis de temperatura presentes no mesmo documento.

5.2.2.1. Cálculo dos coeficientes redutores para a armadura inferior

Neste parágrafo, a título de exemplo, irão ser apresentadas as leituras, quer de temperaturas quer dos próprios coeficientes redutores correspondentes, para os varões que constituem a armadura inferior da viga VF1.1.

A Figura 5.1 representa a leitura da temperatura nos varões inferiores (armadura de tração) da secção da viga.

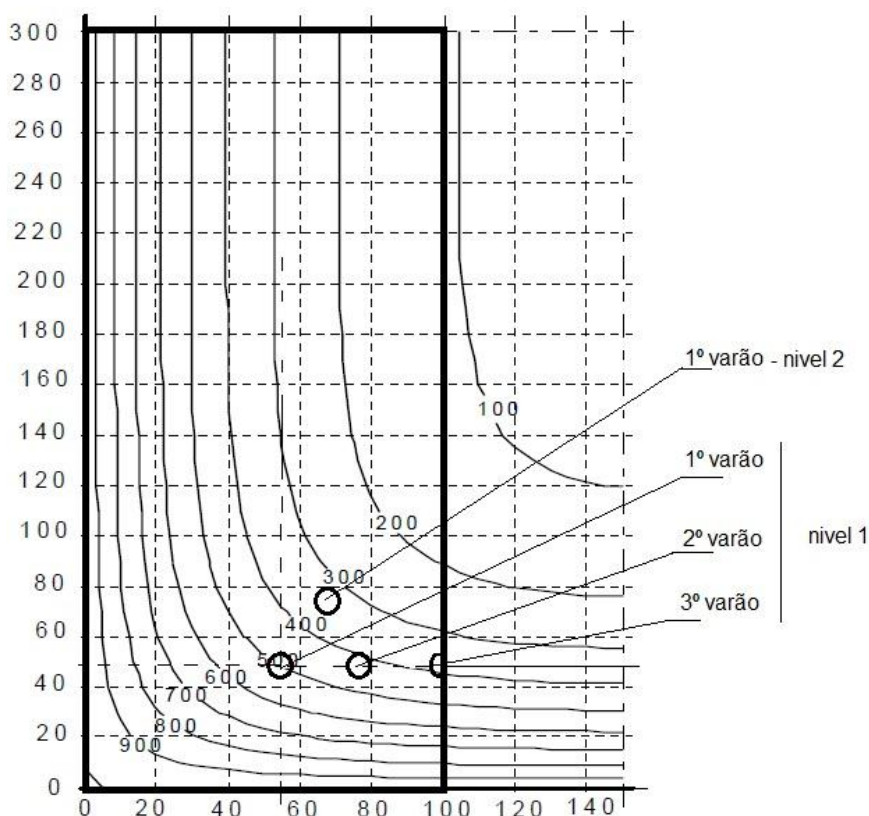


Fig. 5.1 - Perfil de temperatura (°C) para uma viga, hxb = 600 x 300, R90, com representação da secção e varões da armadura inferior da viga VF1.1.

Através da observação da Figura 5.1 pode-se assumir que as temperaturas, no 1º nível de armadura, para o 1º, 2º e 3º varões são, respetivamente, 500°C, 450°C e 380°C, enquanto que no segundo nível de armadura a temperatura no varão é de 340°C.

Durante a realização da análise das vigas do edifício em estudo, na leitura dos perfis de temperatura, aquando da necessidade de recorrer a simplificações estas foram sempre feitas de modo a estar do lado da segurança por forma a não colocar em risco a fiabilidade dos resultados finais de verificação da estrutura. É ainda de salientar que na Figura 5.2 estão representadas as curvas de referência onde se vai ler o correspondente valor de K_s para o caso da viga VF1.1 em relação à curva 1- aço para betão armado.

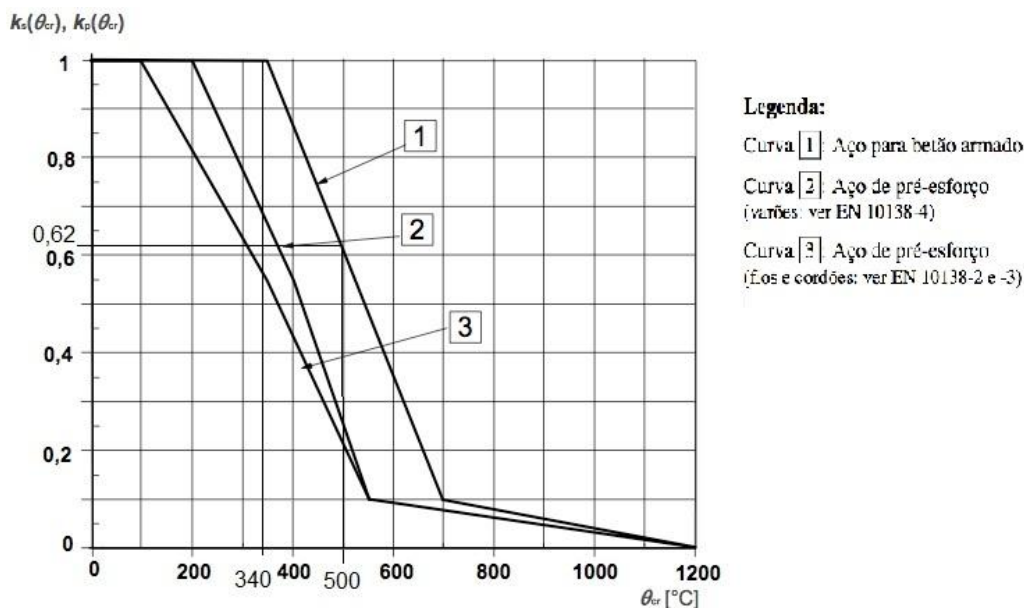


Fig. 5.2 - Curvas de referência para a temperatura crítica dos aços para betão armado e de pré-esforço, θ_{cr} , correspondente ao coeficiente de redução, K_s , [1], com representação da leitura desses coeficientes correspondentes, para o caso da viga VF1.1.

Os valores dos coeficientes de redução de aço assim como as temperaturas lidas nos varões mais periféricos da secção estão presentes no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Temperaturas e coeficientes redutores para a armadura inferior da secção da viga VF1.1.

Diâmetros (ϕ)	Temperatura (°C)	K_s
12	340	1
16	500	0,62

Contudo, no cálculo pelo Método das Zonas, explicado com maior detalhe na secção 3.4.2 do Capítulo 3, é necessário ter em linha de conta o coeficiente de redução do betão, K_c , em 3 zonas mis a zona central.

5.2.2.2. Cálculo dos coeficientes redutores para secção de betão

Para a viga VF1.1, bem como para todas as outras vigas do edifício em estudo, consideram-se 3 zonas aquando da utilização do método das Zonas. As temperaturas, no caso de VF1.1 podem ser lidas na Figura 5.3.

É importante referir que as restantes temperaturas relativas a todas as vigas de betão armado da estrutura do edifício, a introduzir no programa, estão de acordo com os valores presentes no quadro de temperaturas do Anexo B.

De notar que não se adotou nenhuma temperatura abaixo de 100°C, pois abaixo desta temperatura o valor de K_c é igual à unidade, como se pode ver na 6.4, ou seja, a influência na secção é semelhante à temperatura ambiente.

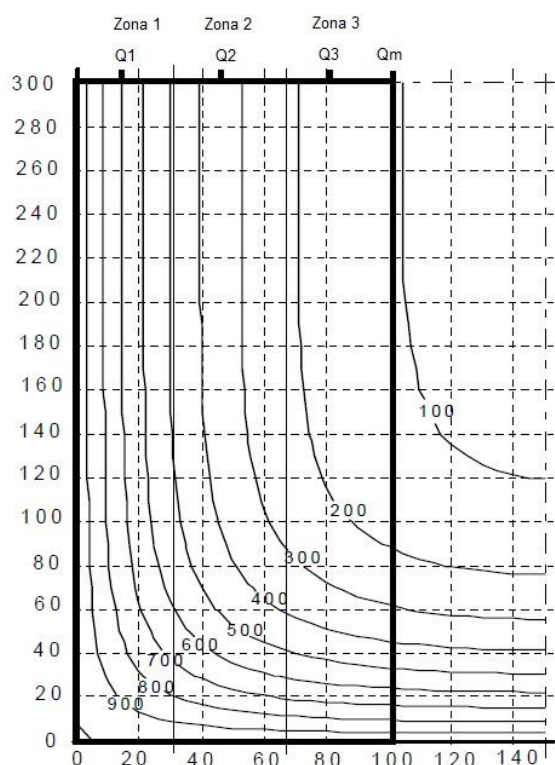


Fig. 5.3 - Perfil de temperatura (°C) para uma viga, $hxb = 600 \times 300$, R90, com representação da secção da viga VF1.1 e divisão em 3 zonas (Método das Zonas).

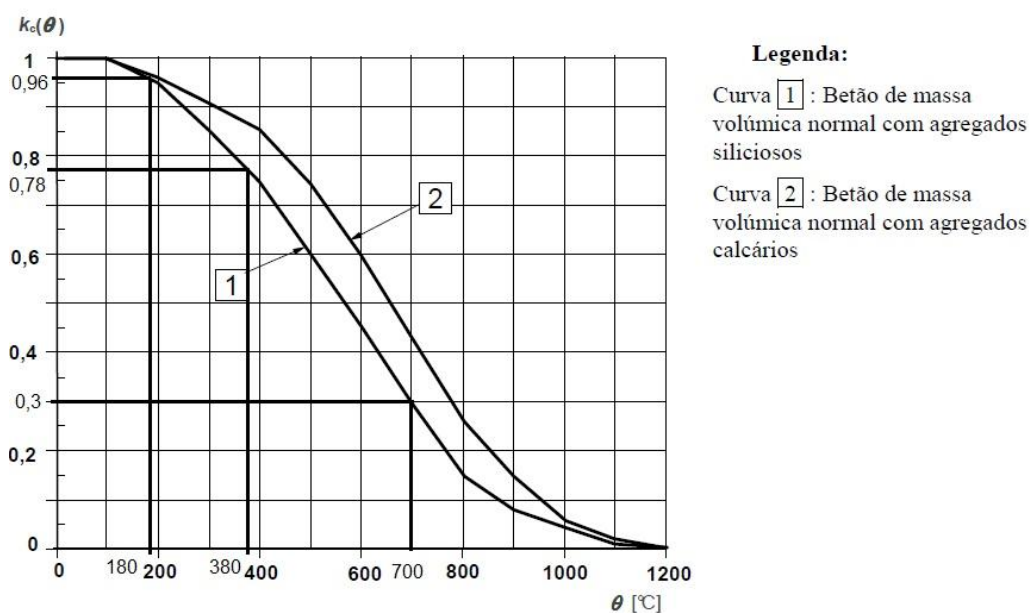


Fig. 5.4 - Coeficiente, $K_c(\theta)$, de redução do valor característico da resistência (f_{ck}) do betão com representação da leitura desses coeficientes correspondentes, para o caso da viga VF1.1.

Os valores dos coeficientes redutores lidos, em relação á curva 1- betão de massa volúmica normal com agregados siliciosos, na Figura 5.4 vão ser agora apresentados, tal como as temperaturas das zonas lidas na Figura 5.3, no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Temperaturas médias e coeficientes redutores das secções de betão.

Secção	Temperatura (°C)	K_c
1	Q1=700	0,30
2	Q2=380	0,78
3	Q3=180	0,96
-	Qm=120	-

5.2.3. CÁLCULO DA CAPACIDADE RESISTENTE DA VIGA PELOS MÉTODOS TABELADOS E SIMPLIFICADOS, DA ISOTÉRMICA DOS 500°C E DAS ZONAS.

5.2.3.1. Viga VF1.1

Nos Quadros 5.4 e 5.5 constam os resultados obtidos através do programa SiFiRe para a viga VF1.1 de momentos resistentes ($M_{rd,fi}$), posição do eixo neutro ($x_{rd,fi}$) e extensões na secção (Ext. Sup., Ext. Inf.) (métodos da isotérmica 500°C e zonas), e a_{min} e b_{min} (método das tabelas).

Quadro 5.4 - Resultados do Método das tabelas.

a	b	a_{min}	b_{min}
0,044	0,2	0,045	0,2

Quadro 5.5 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).

Método	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica $a_{500}=33$	346,68	346,89	0,121	0,0240	0,00217
Zonas $a_z=36,49$	359,16	357,77	0,075	0,0410	0,00135

Apresentam-se nas figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 os valores da *introdução de dados* na página do programa SiFiRe bem como os resultados que daí advêm, respetivamente, no caso dos Métodos Tabelados, da Isotérmica dos 500°C e das Zonas.

Vigas contínuas
Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 90 min

Geometria
b: 0.2 m
h: 30 mm
rec: 30 mm

Armadura de tração
Ø varões: 16 mm

Estribos
Ø varões: 6 mm

Redistribuição
delta: 2 %

Limpar Calcular

Resultados

Resultados
Resultado: R

Informação
amin = 45
bmin = 200
a = 44.0
b = 200.0

Verificar Recobrimento Melhorar Resultado

Fig. 5.5 - Método das Tabelas (viga VF1.1) (SiFiRe).

Em que:

- Tempo – Tempo Resistente indicado pelo RT-SCIE, [7] para a estrutura;
- a – distância do eixo das armaduras longitudinais á face;
- b – largura da secção;
- rec – recobrimento do elemento (superfície até estribos);
- Ø varões – diâmetro das armaduras e estribos;

A utilização deste método (Método das Tabelas ou Tabelado) segue as regras do Capítulo 3 aplicando o Quadro 3.6 para vigas contínuas. O que distingue, em termos de *introdução de dados*, na verificação de vigas simplesmente apoiadas das contínuas é ter em conta a redistribuição dos momentos flectores no segundo caso. Estes métodos só são aplicáveis para vigas expostas até um limite de 3 faces, estando a face superior protegida pela laje. O utilizador pode considerar a quarta face se se verificar o demonstrado no parágrafo 3.3.1.4 no Capítulo 3.

Vigas M+
Métodos Simplificados
Isotérmica a₅₀₀

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 90 min

Geometria
b: 0.2 m
h: 30 mm
rec: 30 mm
l: 0.14 m

Resistências
Classe Betão: 25/30
Tipo de Apoio: 500
f_{ca}: 25000 KPa
f_{yk}: 50000 KPa

Armadura de Compressão
N° varões: 2
Ø varões: 16 mm

Armadura de Tração
1º Nível
N° varões: 5
Ø varões: 16 mm
a: 40 mm

Variação Temp. °C
1: 500
2: 450
3: 380
4: 450
5: 500

2º Nível
N° varões: 2
Ø varões: 12 mm
a: 40 mm

Variação Temp. °C
1: 340
2: 340

Estribos
Ø: 6 mm

Isotérmica 500°C
a₅₀₀: 30 mm

Ações
q_k: Cat C51 (600/9)
ψ_{1,1}: Cat E1 (Armar)

Limpar Calcular

Fig. 5.6 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VF1.1) – introdução de dados (SiFiRe).

Como se pode verificar alguns dos valores a introduzir são idênticos aos utilizados no caso do método anterior, sendo os restantes:

- l – comprimento da viga ao laje;
- l_{inf} – largura de influência das ações a que o elemento está sujeito;
- Níveis de armadura – Nos níveis de armadura deverá considerar o estipulado na Figura 5.3;
- Nº varões – número de varões para cada nível, o tamanho da tabela de temperatura irá variar em função deste valor;
- a – distância da face da secção ao eixo da armadura que deverá ser calculado pela expressão (6.6) para cada Nível/Tipo de armadura;
- Temp°C – temperatura a que se encontra cada um dos varões da armadura de tração;
- a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C, Figura 3.10;

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+
Métodos Simplificados
Isotérmica a_{500}

Resultados

Resultados	
$M_{rd,fi}$	498.2693271 kNm
$M_{ed,fi}$	358.8321714 kNm
x	0.133976843 m
Ext. inf.	0.021500892 mm
Ext. sup.	0.002350547 mm
a_{500}	35 mm
Resultado	OK

Fig. 5.7 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VF1.1) – resultados (SiFiRe).

Em que:

- $M_{rd,fi}$ – Momento resistente para a situação de incêndio;
- $M_{ed,fi}$ – Momento aplicada para situação de incêndio;
- x – posição do eixo neutro;
- Ext. inf. – extensão da armadura inferior;
- Ext. sup. – extensão da armadura superior;
- a_{500} – largura de redução da secção da face pela isotérmica de 500°C;
- Resultado – “OK” ou “KO” conforme verifique ou não a resistência ao fogo da secção.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+
Métodos Simplificados
Zonas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 30 min

Geometria

b: 0.2 m
h: 1 m
xco: 30 mm
l: 4 m
l_{inf}: 8.14 m

Resistências

Classe Betão: 25/30
Tipo de Aço: S500
 f_{yk} : 25000 MPa
 f_{yk} : 50000 MPa

Armadura de Compressão

1ª varões: 2
2ª varões: 16 mm

Armadura de Tração

1ª Nível
1ª varões: 6
2ª varões: 16 mm
s: 44 mm

2ª Nível
1ª varões: 2
2ª varões: 16 mm
s: 42 mm

Estribos

1ª: 6 mm

Cálculo de a_{500}

1ª ações: 3
Temp. med: 450 °C

Ações

qk: Cat. C1: (600/1)
W_{1,1}: Cat. Ex. Armador

Limpar Calcular

Fig. 5.8 - Método das Zonas – introdução de dados (viga VF1.1) (SiFiRe).

Em que:

- Nº secções – Número de secções em que deve ser dividida metade da secção (mínimo 3 secções);
- Temp. med – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0m)}$);
- Temp °C – Temperatura média de cada secção ($K_{c(0n)}$).

Sendo os restantes dados semelhantes aos do método da Isotérmica dos 500°C. Contudo neste caso é ainda necessário introduzir o número de secções (zonas) bem como as respetivas temperaturas, as quais deverão ser dadas em conformidade com a Figura 3.10g) do Capítulo 3 do presente trabalho.



Fig. 5.9 - Método das Zonas (viga VF1.1) – resultados (SiFiRe).

Em que:

- a_z – largura de redução da secção da face [mm].

Em todas as secções avaliadas considerou-se que apenas três faces se encontravam expostas a incêndio, enquanto a quarta face (face superior) se encontrava protegida pela laje de betão.

Apesar da Memória Descritiva do projeto em estudo estar bastante completa no que diz respeito aos valores de cálculo utilizados no dimensionamento da estrutura do edifício, apenas facultava alguns dos momentos de cálculo, quer positivos quer negativos, de dimensionamento das vigas. Assim, foi adotado que os momentos positivos eram, em todas as situações, mais desfavoráveis em termos de ações.

5.2.3.2. Viga VC5.1

Nos Quadros 5.6 e 5.7 estão resumidos os resultados da aplicação do programa SiFiRe referente à análise da viga VC5.1.

Quadro 5.6 - Resultados do Método Tabelado.

a	b	a_{min}	b_{min}
0,0046	0,300	0,0040	0,300

Quadro 5.7 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).

Método	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica $a_{500}=31$	518,064	361,418	0,0338	0,115	-0,00125
Zonas $a_z=37,720$	518,251	360,913	0,0778	0,00152	-0,00009

Nas figuras que seguem constam as páginas do programa SiFiRe de *introdução de dados e saída de resultados* dos respetivos método das Tabelas (Figura 5.10), método da Isotérmica dos 500°C (Figuras 5.11 e 5.12) e método das Zonas (Figuras 5.13 e 5.14).

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas Simplesmente apoiadas
Método das Tabelas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 120 min

Geometria
b: 0.25 m
rec: 30 mm

Armadura de tracção
varões: 16 mm

Estribos
varões: 8 mm

Limpar Calcular

Resultados

Resultados
Resultado: KO

Informação
amin = 59.1666666667
bmin = 250.0
a = 46.0
b = 250.0

Verificar Recobrimento Melhorar Resultado

Fig. 5.10 - Método das Tabelas (viga VC5.1) (SiFiRe).

O resultado mostrado pelo programa é *KO* pois o valor do parâmetro a é inferior ao a_{min} requerido.

Nas Figuras 5.11 e 5.12 são então apresentadas, por esta ordem, as páginas de dados e resultados relativas ao método da Isotérmica dos 500°C.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão Início | Exportar | Abrir A

Vigas M+
Métodos Simplificados
Isotérmica a₅₀₀

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 90 min

Geometria
b: 0.3 m
h: 1.2 m
rec: 30 mm
l: 6 m
l_{inf}: 0.24 m

Resistências
Classe Betão: 25/30
Tipo de Aço: 500
f_{ck}: 25000 KPa
f_{yk}: 500000 KPa

Armadura de Compressão
N° varões: 3
Ø varões: 16 mm

Armadura de Tração
1º Nível
N° varões: 5
Ø varões: 16 mm
a: 46 mm

Estribos
Ø: 8 mm

Isotérmica 500°C
a500: 31 mm

Ações
qk: Cat. C5: (6kN/m)
ψ_{i,1}: Cat. E: Armazem

Varão Temp. °C
1: 490
2: 360
3: 300
4: 360
5: 490

2º Nível
N° varões: 0
Ø varões: 16 mm
a: 46 mm

Fig. 5.11 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VC5.1) – introdução de dados (SiFiRe).

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+
Métodos Simplificados
Isotérmica a₅₀₀

Resultados

Resultados
M_{red, fi}: 518.0643015 kNm
M_{ed, fi}: 361.4182923 kNm
x: 0.033876400 m
Ext. inf.: 0.115727542 mm
Ext. sup.: -0.00125257 mm
a500: 31 mm
Resultado: OK

Fig. 5.12 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga VC5.1) – resultados (SiFiRe).

Assim, para este método, estamos perante um resultado positivo, pelo que verifica a resistência da viga.

De seguida são apresentadas as Figuras 5.13 e 5.14 semelhantes às anteriores mas relativas ao método das Zonas.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão Início | Exportar | Abrir Ajuda

Vigas M+
Métodos Simplificados
Zonas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo min

Geometria
b m
h m
rec mm
l m
l_{inf} m

Resistências
Classe Betão
Tipo de Aço
f_{ck} KPa
f_{yk} KPa

Armadura de Compressão
N° varões
Ø varões mm

Armadura de Tração
1º Nível
N° varões *
Ø varões mm
a mm

Varão	Temp °C
1	490
2	360
3	300
4	360
5	490

2º Nível
N° varões *
Ø varões mm
a mm

Estribos
Ø mm

Cálculo de a_z
N° secções *
Temp. med °C

Varão	Temp °C
1	580
2	200
3	100

Acções
q_k
ψ_{1,1}

Fig. 5.13 - Método das Zonas (viga VC5.1) – introdução de dados (SiFiRe).

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+
Métodos Simplificados
Zonas

Resultados

Resultados

M_{ed,ei} kNm
M_{ed,ei} kNm
x m
Ext. inf. mm
Ext. sup. mm
a_s mm
Resultado

Fig. 5.14 - Método das Zonas (viga VC5.1) – resultados (SiFiRe).

Pela figura acima pode-se concluir que o momento resistente da viga é superior ao momento à qual é solicitada sendo a mensagem OK enviada pelo programa.

No parágrafo seguinte irá ser feita uma apresentação semelhante mas para a viga V1A.8.

5.2.3.3. Viga V1A.8

Nos Quadros 5.8 e 5.9 encontram-se os valores lançados pelo programa após a verificação da capacidade resistente da viga V1A.8.

Quadro 5.8 - Resultados do Método Tabelado

a	b	a_{min}	b_{min}
0,0044	0,250	0,0042	0,250

Quadro 5.9 - Resultados obtidos para a viga sujeita a momentos positivos (Métodos Simplificados).

Método	$M_{rd,fi}$ (KN.m)	$M_{ed,fi}$ (KN.m)	$x_{rd,fi}$ (m)	Ext. Sup. (m)	Ext. Inf. (m)
Isotérmica $a_{500}=33$	420,787	296,422	0,0426	0,0748	-0,00027
Zonas $a_z=35,75$	420,704	296,422	0,0439	0,0725	-0,00016

Na Figura 5.15 apresentam-se os valores resultantes da análise pelo método das Tabelas.

Fig. 5.15 - Método das Tabelas (viga V1A.8) (SiFiRe).

Na análise da viga V1A.8, e sendo a resistência ao fogo mínima requerida de 90 minutos para o piso do corpo Torre onde se encontra inserida (piso 8), o resultado deu OK pois o valor de a é superior ao a_{min} .

Nas Figuras 5.16 e 5.17 são mostrados os dados e resultados, respetivamente, da verificação segundo o método da Isotérmica dos 500°C.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Início | Exportar | Abrir Ajuda | Manual

Vigas M+

Métodos Simplificados

Isotérmica a_{500}

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 90 min

Geometria
 b: 0.25 m
 h: 1 m
 rec: 30 mm
 l: 3 m
 l_{inf}: 0.19 m

Resistências
 Classe Betão: 25/30
 Tipo de Aço: 500
 f_{ck} : 25000 KPa
 f_{yk} : 500000 KPa

Armadura de Compressão
 N° varões: 3
 Ø varões: 16 mm

Armadura de Tracção
1º Nível
 N° varões: 5
 Ø varões: 16 mm
 a: 46 mm

Varão	Temp. °C
1	500
2	390
3	340
4	390
5	500

2º Nível
 N° varões: 0
 Ø varões: 16 mm
 a: 46 mm

Estribos
 Ø: 8 mm

Isotérmica 500°C
 a₅₀₀: 33 mm

Ações
 q_k: Cat. C5: (6kN/m²)
 $\psi_{1,1}$: Cat. E: Armazenar

Limpar | Calcular

Fig. 5.16 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga V1A.8) – introdução de dados (SiFiRe).

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+

Métodos Simplificados

Isotérmica a_{500}

Resultados

M _{ed, fi}	420.7871693 kNm
M _{ed, fi}	297.0239692 kNm
x	0.042616387 m
Ext. inf.	0.074850142 mm
Ext. sup.	-0.00027788 mm
a ₅₀₀	33 mm
Resultado	OK

Fig. 5.17 - Método da Isotérmica dos 500°C (viga V1A.8) – resultados (SiFiRe).

Tal como aconteceu no método das tabelas, recorrendo ao método da Isotérmica dos 500°C a viga V1A.8 possui um momento resistente superior ao atuante pelo que o resultado mostrado é OK.

De seguida o mesmo processo de verificação vai ser feito, mas de acordo com o método das Zonas onde se pode ver, através das Figuras 5.18 e 5.19 os dados a introduzir e os consequentes resultados da verificação.

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão Início | Exportar | Ajuda

Vigas M+
Métodos Simplificados
Zonas

Dados

Resistência ao Fogo
Tempo: 90 min

Geometria
b: 0.25 m
h: 1 m
rec: 30 mm
l: 6 mm
l_{inf}: 0.19 m

Resistências
Classe Betão: 25/30
Tipo de Aço: 500
f_{ak}: 25000 KPa
f_{yk}: 500000 KPa

Armadura de Compressão
N° varões: 3
Ø varões: 16 mm

Armadura de Tração
1º Nível
N° varões: 5
Ø varões: 16 mm
a: 46 mm

2º Nível
N° varões: 0
Ø varões: 16 mm
a: 46 mm

Estribos
Ø: 8 mm

Cálculo de a_z
N° secções: 3
Temp. med: 100 °C

Varão	Temp °C
1	600
2	290
3	120

Acções
qk: Cat. C5: (6kN/s)
ψ_{1,1}: Cat. E: Armazen

Limpar | Calcular

Fig. 5.18 - Método das Zonas (viga V1A.8) – introdução de dados (SiFiRe).

SiFiRe – Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão

Vigas M+
Métodos Simplificados
Zonas

Resultados

M _{red, fi}	420.7047962	kNm
M _{ed, fi}	296.4223026	kNm
x	0.043929497	m
Ext. inf.	0.072508154	mm
Ext. sup.	-0.00016496	mm
a _z	35.75000000	mm
Resultado	OK	

Fig. 5.19 - Método das Zonas (viga V1A.8) – resultados (SiFiRe).

Pelo método das Zonas a viga verifica a resistência às solicitações sendo os valores obtidos muito semelhantes aos encontrados pelo método utilizado anteriormente, o método da Isotérmica dos 500°C.

5.3. CONCLUSÕES

Após a análise de todas as vigas de betão armado que constituem a estrutura do edifício, apresentam-se de seguida, nas Figuras 5.20 e 5.21 as plantas onde constam as vigas que não verificaram a capacidade resistente quando expostas a incêndio (vigas evidenciadas a traço vermelho).



Fig. 5.20 - Planta do edifício Nave com evidência das vigas que não verificaram a resistência ao fogo requerida.

Como se pode ver pela Figura 5.20 e, pela análise do quadro do Anexo C, a Viga VD7.0 foi a única a não verificar a resistência requerida sob ação do fogo.

Na figura seguinte irá ser apresentada a planta do edifício Torre.

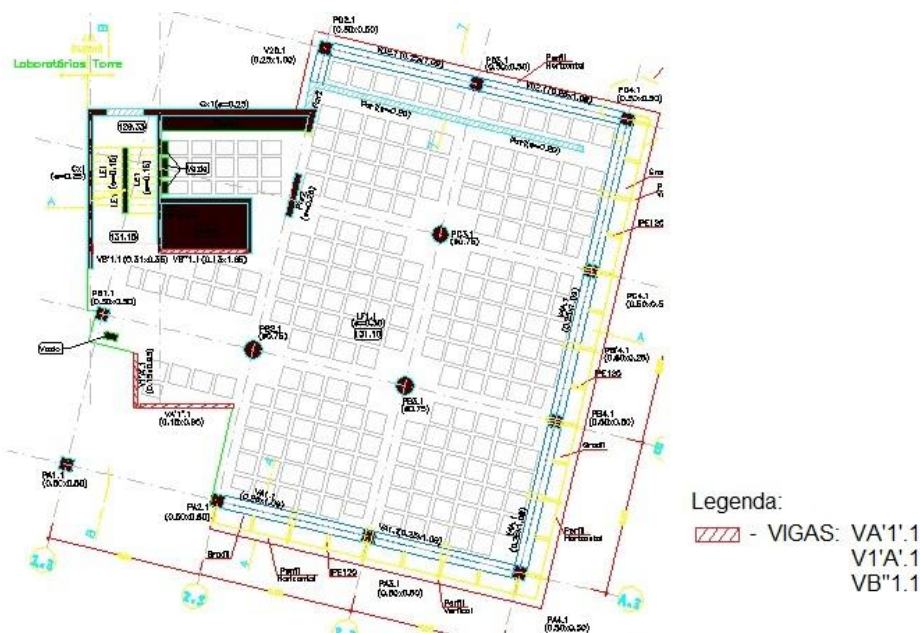


Fig. 5.21 - Planta do edifício Torre com evidência das vigas que não verificaram a resistência ao fogo requerida.

No presente caso, edifício Torre, e pela análise da Figura 5.21, registam-se 3 vigas, VA'1.1, V1'A'.1 e VB''1.1, que falharam na avaliação da capacidade resistente quando submetidas a incêndio. Contudo, pela análise do quadro do Anexo C nos pisos superiores as vigas VB''1.2, VB''1.3, VB''1.4, VB''1.5, VB''1.6 e VB''1.7 também não verificam a resistência mínima requerida. De salientar que a

posição, em planta, destas últimas é semelhante á da posição da viga VB''1.1 que se pode ver na Figura 5.21.

Assim, das 114 vigas analisadas (262 tramos no total), 8 não cumpriram a resistência requerida, feita a análise pelos métodos das Tabelas, da Isotérmica dos 500°C e Zonas. Considerando apenas a análise pelo método das tabelas, já 27 das 114 vigas não verificaram essa mesma resistência. De notar que as vigas que não cumprem a resistência mínima pelos três métodos (11 vigas), apresentam secções pequenas, $b < 0,160m$, ou diâmetros de varões de armadura de tração e estribos igualmente pequenos ($\phi 10$ e $\phi 12$ em varões e $\phi 6$ nos estribos).

O método das tabelas, por ser mais conservativo e não ter em conta o número de varões (nem todos os níveis de armadura bem como as armaduras de compressão presentes em cada secção) apresenta maior número de “KO”. Em quase todos os casos, o método das Tabelas, apresentou-se como o mais conservativo enquanto o método das Zonas como o mais rigoroso, podendo este fato ser explicado pelas baixas temperaturas nas secções que se pretendiam verificar.

Para que a estrutura verifique as condições de segurança em situação de incêndio deverão ser analisados os casos onde esta não é verificada, corrigindo a disposição de armaduras ou as dimensões dessas vigas.

Refira-se ainda que a segurança a temperatura ambiente também deverá ser satisfeita, logo a correção da posição e da quantidade de armaduras deverá ter, igualmente, em consideração esta exigência.

6

CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO

6.1. CONCLUSÕES GERAIS

Nos últimos anos tem-se assistido a um crescimento dos recursos económicos onde se verifica uma consequente preocupação com a evolução tecnológica. Assim, o nível de exigências por parte da sociedade cresce associado a tal evolução. Perante esta visão o ramo da construção civil não fica de fora pelo que a preocupação com a segurança das estruturas dos edifícios é crescente, levando a que sejam mais recorrentes análises e verificações tendo em conta ações acidentais, tais como sismos, tempestades (vento e neve) e ao fogo. Esta última, assunto central desta dissertação, tem vindo a ganhar importância nas diversas áreas da construção. Contudo, devido ao seu elevado grau de complexidade, as suas verificações ficam aquém do desejado não se conseguindo assegurar a completa aceitação destas.

Um dos materiais com melhor desempenho quando exposto a situações de incêndio é o betão, sendo por esse motivo o mais utilizado, atualmente, na construção. Contudo, por se tratar de um material heterogéneo, o seu comportamento em diversas situações não é totalmente controlado pelo que a regulamentação é essencial quando se dimensionam estruturas em betão.

Assim, a implementação em Portugal dos novos Eurocódigos trouxe um conjunto de normas e métodos que auxiliam os projetistas nas verificações, ainda que “superficiais” das estruturas de betão expostas ao fogo. Os métodos Tabelados e Simplificados, da Isotérmica dos 500°C e das Zonas, presentes no Eurocódigo 2, parte 1-2, [1], são bastante fiáveis tendo no entanto, os segundos mais que o primeiro, procedimentos de cálculo que requerem um tempo considerável.

O método das Tabelas é rápido e de aplicação simples sendo, contudo, o menos rigoroso. Aplica-se consultando tabelas que especificam dimensões e recobrimentos mínimos para as secções de betão armado de modo a verificarem um determinado tempo de resistência ao fogo especificado na regulamentação existente, RJ-SCIE, [6] e RT-SCIE, [7].

A aplicação dos métodos Simplificados requer a utilização de variáveis de mais difícil estimação como é o caso da leitura dos perfis de temperatura onde os erros são recorrentes e em nada desprezáveis, onde pequenos desvios nessa leitura geram erros da ordem dos 100°C nas respetivas temperaturas. Contudo, tanto o método da Isotérmica dos 500°C como o método das Zonas, com um procedimento de cálculo semelhante entre si, são bastante rigorosos nas verificações da capacidade resistente de secções de betão expostas ao fogo e aconselha-se a sua utilização quando se pretende efetuar uma análise mais rigorosa. O método das Zonas, sendo o mais rigoroso dos três métodos referidos, é

também aquele que exige que se disponha de perfis de temperatura com um maior grau de rigor. Contudo, através nas análises efetuadas recorrendo aos métodos Simplificados os seus resultados foram muito semelhantes.

Os métodos referidos são menos precisos na medida em que apenas analisam as estruturas elemento a elemento não tendo em conta o efeito global das estruturas e a interação entre as diversas partes que as compõem, não refletindo as verificações por eles efetuadas o carácter hiperestático das estruturas reais que se pretendem avaliar.

Na avaliação do edifício pelo programa SiFiRe procurou-se utilizar os métodos Simplificados na verificação das vigas que o constituem que se revelou bastante útil, principalmente sob o ponto de vista de tempo gasto.

No que diz respeito aos resultados obtidos, apenas uma pequena percentagem das vigas não verificava a resistência ao fogo requerida. Concluiu-se que os fatores que mais influenciam a capacidade resistente dos elementos é a disposição das armaduras e o seu recobrimento. Assim verificou-se que as secções delgadas, com $b < 0,150\text{m}$ apresentavam valores da capacidade resistente inferior á atuante. De referir que as exigências no edifício em questão podem ser consideradas algo gravosas já que na maioria das estruturas correntes as exigências são menores uma vez que o grau de risco corrente das estruturas é efetivamente menor, embora este dependa, como já referido, do tipo de ocupação da estrutura.

6.2. TRABALHO FUTURO

O programa de cálculo SiFiRe, que tem como base os métodos do Eurocódigo é sem dúvida uma ferramenta bastante útil na avaliação da capacidade resistente de elementos isolados sujeitos a incêndio. Em termos de funcionalidades era importante que se melhorasse a introdução de dados, incluindo uma opção onde se pudesse introduzir, por meio de tabela, as características dos elementos a avaliar, através de um só ficheiro como forma de ser viável utilizar o programa no dimensionamento de estruturas de betão armado.

Ainda no programa SiFiRe era importante completar a introdução de dados, no caso dos métodos da Isotérmica dos 500°C e das Zonas, de maneira a ser possível contemplar mais níveis de armadura (passando a ser 3 possíveis na armadura inferior e dois na armadura superior). Estando o programa dependente da leitura dos perfis de temperatura, seria interessante integrar-se neste, um outro, que criasse estes perfis para cada secção de modo a diminuir os erros que advêm da falta de precisão dos utilizadores e, não menos importante, acelerar o processo de verificação.

De modo a verificar a fiabilidade do modelo SiFiRe seria útil efetuar uma análise a esse ponto de modo a validar o mesmo. Assim, seria vantajoso tentar efetuar uma comparação entre os resultados obtidos através do programa SiFiRe e do modelo SimFIRb desenvolvido por Gonçalves, [4].

Além dos métodos em utilização no programa, seria útil implementar neste os modelos SimFIRb e SimFIRc por serem métodos simplificados com uma precisão de cálculo que se aproxima muito dos modelos avançados.

Tendo em conta que todos os métodos referidos fazem uma verificação ao nível da secção, num trabalho futuro poder-se-ia criar modelos numéricos que fossem capazes de fazer uma análise global de estruturas de betão armado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurocódigo 2 – *Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Verificação de resistência ao fogo*, LNEC, 2010.
- [2] Gonçalves, Tiago, *Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão – Comportamento Global de Estruturas em Situação de Incêndio*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Eng. Civil, Lisboa, IST.
- [3] Eurocódigo 1 – *Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções em estruturas expostas ao fogo*, LNEC, 2010.
- [4] Gonçalves, Miguel, *Comportamento ao Fogo de Elementos Estruturais de Betão Análise Numérica e Metodologia*. Tese de Doutoramento em Eng. Civil, Porto, FEUP.
- [5] Fernandes, Márcio, *Verificação da resistência ao Fogo de Estruturas de Betão com Base nos Métodos Simplificados do EC2 – Parte 1-2*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Eng. Civil, Porto, FEUP.
- [6] Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios - Decreto-Lei nº 220/2008, 12 de Novembro.
- [7] Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios - Portaria nº 1532/2008, 29 de Dezembro.
- [8] Guimarães, Nuno, *Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão – Modelação numérica dos métodos Tabelados e Simplificados e Aplicação a um Projecto*. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Eng. Civil, Porto, FEUP.
- [9] Eurocódigo 2 – *Acções em estruturas, Parte 1-1: Acções gerais*, LNEC, 2010.
- [10] I.Cabrita Neves; J. Brito, *Avaliação e Reparação de Estruturas de Betão Danificadas pelo Fogo*, IST, 1997.
- [11] Eurocódigo 2 – *Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, LNEC, 2010.
- [12] Eurocódigo 0- *Bases para o projecto de estruturas*. LNEC, 2009
- [13] J.D'Arga ; V.Monteiro; Mary Mun, *Betão Armado – Esforços Normais e de Flexão(REBAP-83)*, LNEC, Lisboa, 1985.
- [14] REBAP – *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado*, Decreto-Lei nº349-C/83 de 30 de Junho, Lisboa, 1983.
- [15]Especificações do LNEC E 464:2005 – “*Betões. Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*”.
- [16] JIMENEZ MONTOYA, P. (1969). *Hormigón armado: 14 edición basada en la EHE ajustada al código modelo y al eurocódigo* .
- [17] *Despacho n.º 2074/2009 - Critérios técnicos para determinação da densidade de carga de incêndio modificada*.

ANEXOS

A

PERFIS DE TEMPERATURA DO EUROCÓDIGO 2, PARTE 1-2

Neste Anexo vão ser apresentados os perfis de temperatura para vigas, retirados do Anexo A do Eurocódigo 2, parte 1-2 [1].

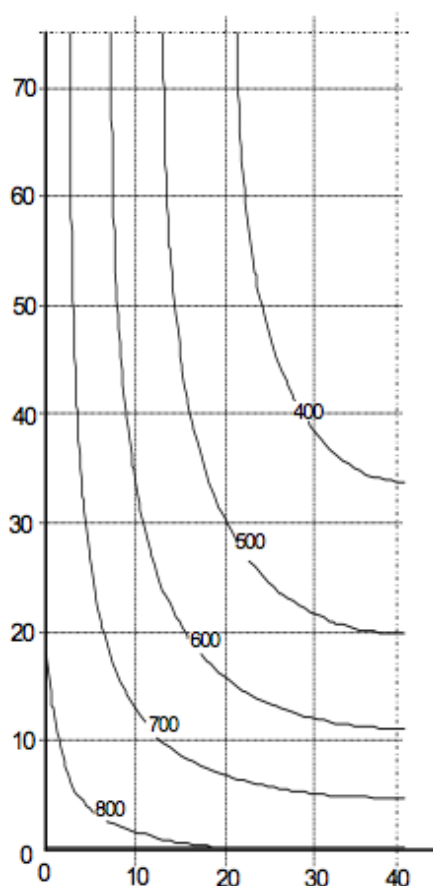


Fig. A.1 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 150 \times 80$ – R 30.

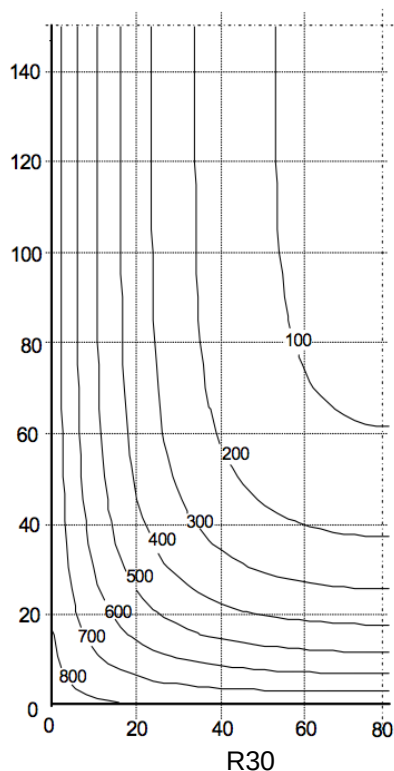


Fig. A.2 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$.

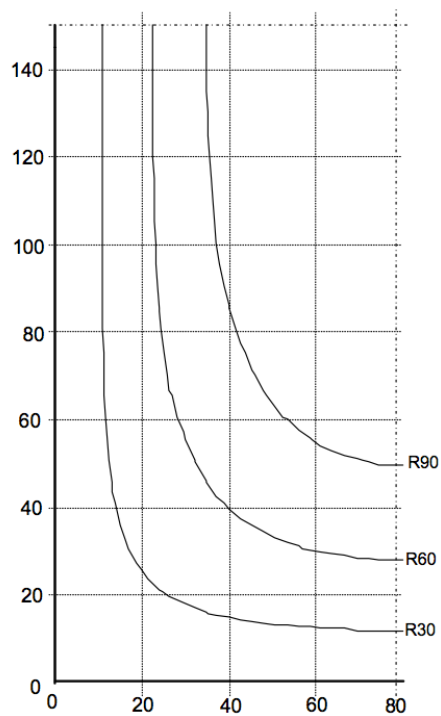
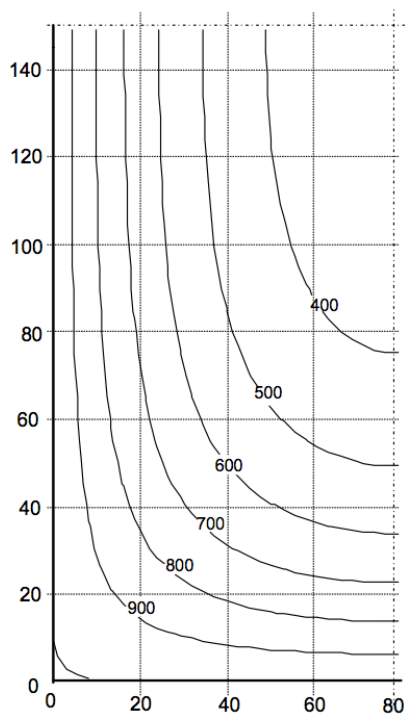
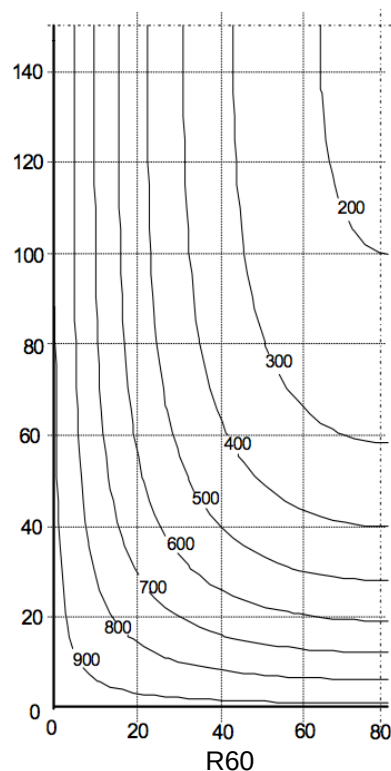


Fig. A.3 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 300 \times 160$ – R90 e Isotérmica de 500°C para uma viga $h \times b = 300 \times 160$.

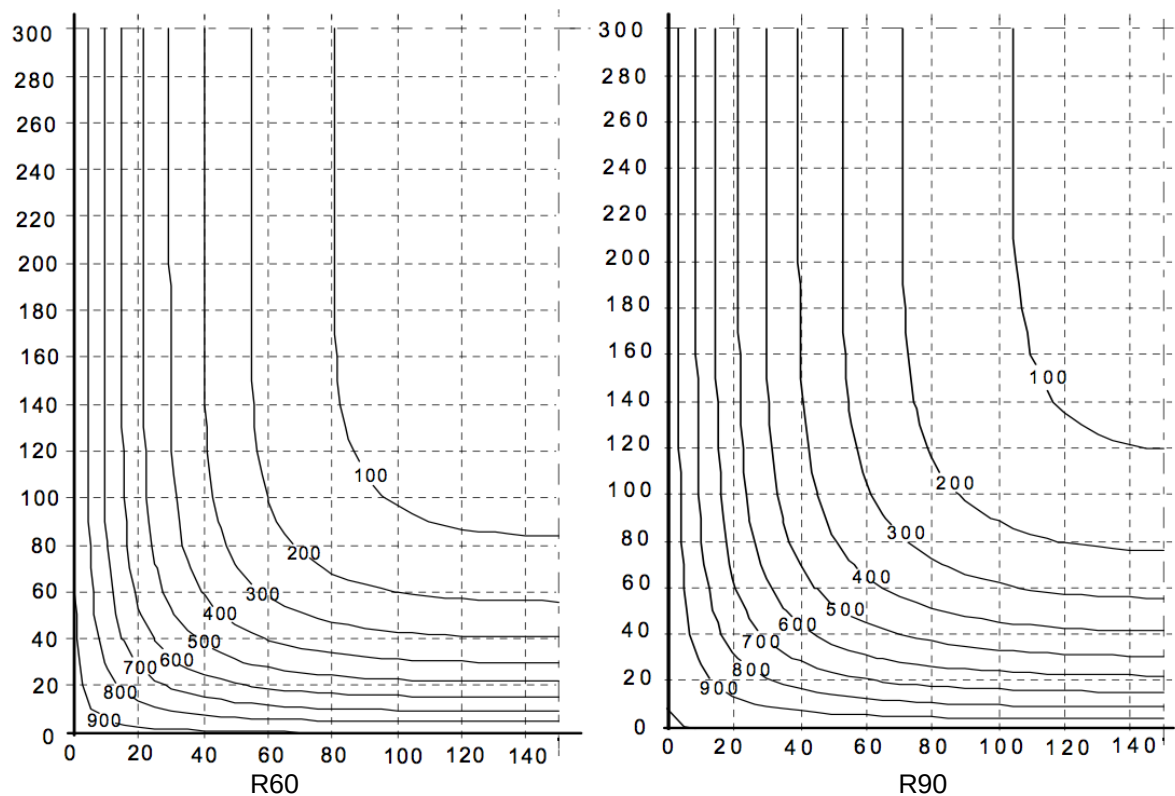


Fig. A.4 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$.

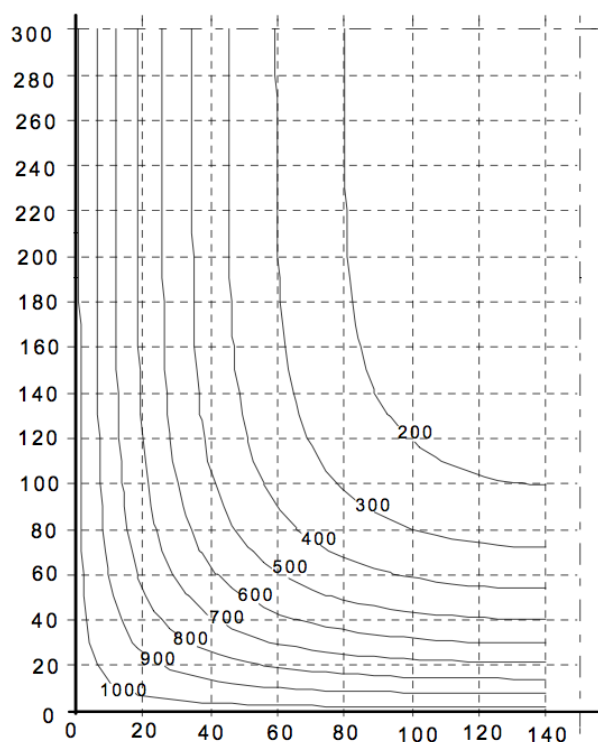


Fig. A.5 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 600 \times 300$ – R 120.

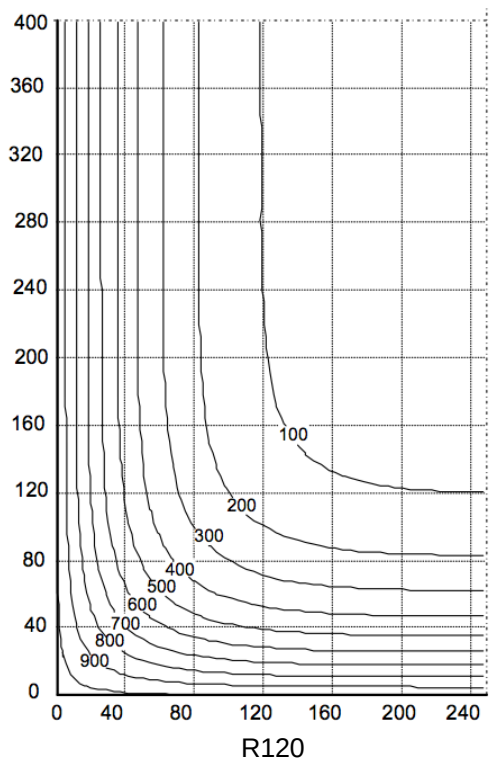
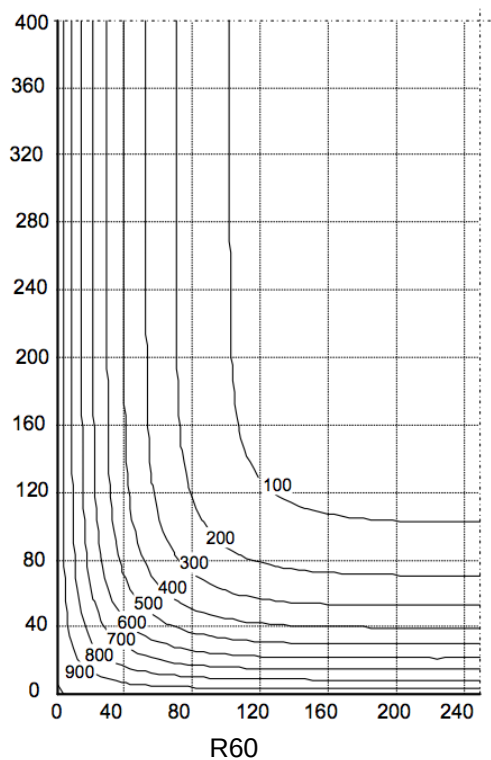


Fig. A.6 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$.

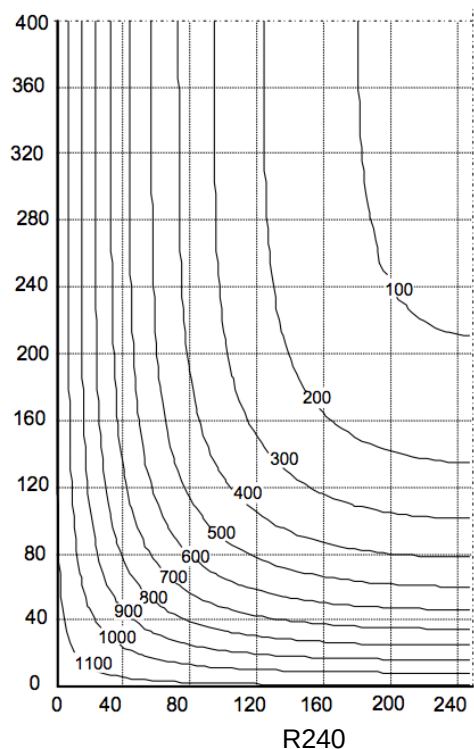
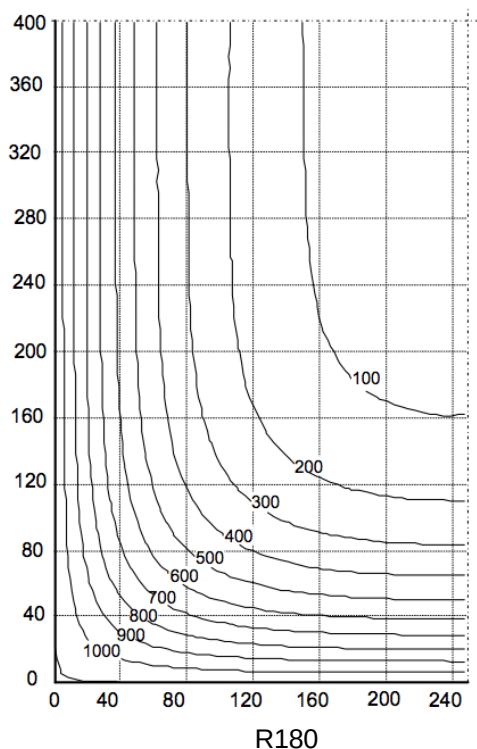


Fig. A.7 Perfis de temperatura (°C) para uma viga, $h \times b = 800 \times 500$.

B

QUADROS DE TEMPERATURAS PARA ESTUDO DAS VIGAS DO EDIFÍCIO

Neste Anexo são apresentadas as temperaturas dos varões para o Método Isotérmica dos 500°C e das Zonas e das temperaturas médias das zonas escolhidas para o método das zonas que foram retiradas da leitura dos perfis de temperatura lidos no Eurocodigo 2, parte 1-2, [1], para as vigas em estudo no Capítulo 5.

Edifício	Piso	Resistência ao fogo	Viga	b (m)	h (m)	Armadura inferior	Temperaturas															
							Varões												Zonas			
							1º Nível							2º Nível								
							1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	5º(°C)	6º(°C)	7º(°C)	1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	Q1(°C)	Q2(°C)	Q3(°C)	Q _M (°C)	
TORRE	0	R90	V3B.0	0,75	0,45	5d16+4d12	480	310	300	310	480			210	160	160	210	400	100	100	100	
			VB1.0	0,75	0,45	7d12+3d16	420	280	250	250	250	280	420	210	160	210	-	400	100	100	100	
			VembB'1.0	0,5	0,3	5d12	480	310	300	310	480							400	100	100	100	
			V2C.0	0,25	1,9	5d12	530	390	350	390	530							600	290	120	100	
			VC3.0	0,2	1,4	5d16	500	450	380	450	500							700	380	180	120	
			VC2'.0	0,2	0,6	5d16	500	450	380	450	500							700	380	180	120	
			VB'1.0	0,75	0,45	3d16	480	300	480									400	100	100	100	
			VD2'.0	0,25	0,5	4d12	530	390	390	530								600	290	120	100	
			VD2.0	0,25	0,6	6d20	500	410	370	370	410	500						600	290	120	100	
	1	R90	VA'1.1	0,15	0,95	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
			V1'A.1	0,15	0,95	2d20+2d16	600	600						510	510			770	490	400	400	
			VB"1.1	0,13	1,65	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
			VB'1.1	0,31	0,35	3d12+2d16	570	360	570					240	240			580	200	100	100	
			VA1.1	0,25	1,09	4d25+2d20	450	340	340	450				280	280			600	290	120	100	
			V4A.1	0,25	1,09	4d25+2d20	450	340	340	450				280	280			600	290	120	100	
			VD2.1	0,25	1,09	6d12+4d10	530	390	350	350	390	530		320	220	220	320	600	290	120	100	
	2	R90	VA1.2	0,25	1	4d25+2d20	450	340	340	450				280	280			600	290	120	100	
			VD2.2	0,25	1	4d25+2d20	450	340	340	450				280	280			600	290	120	100	
			V4A.2	0,25	1	4d25+2d20	450	340	340	450				280	280			600	290	120	100	
			V1A.2	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB'1.2	0,31	0,35	3d12+2d16	570	360	570					240	240			580	200	100	100	
			V2D.2	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB"1.2	0,13	1,2	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
	3 e 4	R90	VA1.3/ 4	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			VD2.3/ 4	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			V4A.3/ 4	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			V1A.3/ 4	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB'1.3/ 4	0,31	0,35	3d12+2d16	570	360	570					240	240			580	200	100	100	
			V2D.3/ 4	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB"1.3/ 4	0,13	1,2	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
	5, 6, 7 e 8	R90	VA1...	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			VD2...	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			V4A...	0,25	1	4d16+2d12	500	390	390	500				280	280			600	290	120	100	
			V1A...	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB'1...	0,31	0,35	3d12+2d16	570	360	570					240	240			580	200	100	100	
			V2D...	0,25	1	5d16	500	390	340	390	500							600	290	120	100	
			VB"1...	0,13	1,2	3d12	600	560	600									770	490	400	400	

Edifício	Piso	Resistência ao fogo	Viga	b (m)	h (m)	Armadura inferior	Temperaturas															
							Varões												Zonas			
							1º Nível							2º Nível								
							1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	5º(°C)	6º(°C)	7º(°C)	1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	Q1(°C)	Q2(°C)	Q3(°C)	Q _M (°C)	
Nave	0	R90	V6A.0	0,2	0,6	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
			VA5.0'	0,2	0,5	4d12	530	390	390	530								700	380	180	120	
			VA6.0	0,25	0,8	5d16	500	390	340	390	500								600	290	120	100
			VD7.0	0,15	1,95	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
			VembA4.0	0,7	0,3	7d20	420	280	250	250	250	280	420						400	100	100	100
	1 e 2	R90	VC5.1	0,3	1,2	5d16	490	360	300	360	490							580	200	100	100	
			V9C.1	0,3	1,2	5d16	490	360	300	360	490							580	200	100	100	
			VE5.1	0,4	0,6	4d20	420	290	290	420								500	130	100	100	
			VF5.1	0,4	0,6	4d20	420	290	290	420								500	130	100	100	
			VF'3.1	0,3	1,2	4d16+2d12	490	360	360	490				280	280			580	200	100	100	
			Vemb8C.1	0,5	0,3	4d20+3d20	480	310	310	480				210	160	210		400	100	100	100	
			VC5.1'	0,2	0,4	4d12	530	390	390	530								700	380	180	120	
			VE1.1	0,4	0,6	4d16+3d16	690	530	530	690				380	380			500	130	100	100	
			VC1.1	0,4	0,6	4d16+3d16	690	530	530	690				380	380			500	130	100	100	
			V1A.1	0,4	0,6	4d16+3d16	690	530	530	690				380	380			500	130	100	100	
			VA1.1	0,4	0,6	4d16+3d16	690	530	530	690				380	380			500	130	100	100	
			V5E.1/2	0,4	0,6	5d20	420	290	260	290	420							500	130	100	100	
			V6E.1/2	0,4	0,6	3d20+3d25	420	250	420					290	110	290		500	130	100	100	
			VD7.1	0,15	1,95	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
			VE3.1	0,3	1,2	5d16	490	360	300	360	490							580	200	100	100	
			VembC'8.1	0,4	0,3	5d20	420	290	260	290	420							480	130	80	60	
			V1	0,16	0,26	3d12	600	560	600									770	490	400	400	
			VF5.2	0,4	0,6	5d20	420	290	260	290	420							500	130	100	100	
			VE5.2	0,4	0,6	4d20	420	290	290	420								500	130	100	100	
			V7E.1/2	0,4	0,6	5d20	420	290	260	290	420							500	130	100	100	

Edifício	Piso	Resistência ao fogo	Viga	b (m)	h (m)	Armadura inferior	Temperaturas															
							Varões												Zonas			
							1º Nível							2º Nível								
							1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	5º(°C)	6º(°C)	7º(°C)	1º(°C)	2º(°C)	3º(°C)	4º(°C)	Q1(°C)	Q2(°C)	Q3(°C)	Qm(°C)	
Laboratórios	0	R90	V3F.0'	0,2	0,5	4d12	530	390	390	530							700	380	180	120		
			V6F'.0	0,2	0,5	4d12	530	390	390	530								700	380	180	120	
			VembG5.0	0,7	0,3	5d16	480	310	300	310	480							400	100	100	100	
			Vemb4D.0	0,5	0,3	4d20+3d20	480	310	310	480				210	160	210		400	100	100	100	
			VE3.0	0,2	0,7	4d16+3d16	500	400	400	500				340	300	340		700	380	180	120	
			VB'1.0	0,2	0,7	6d16+2d12	500	430	390	390	430	500		300	300			700	380	180	120	
			VC8.0	0,2	1	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
			V8B.0	0,2	1	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
			VF7.0	0,25	0,7	6d16+2d12	500	410	370	370	410	500		280	280			600	290	120	100	
			Vinv6F.0	0,2	1,7	5d16+2d12	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
	1	R90	V9C.0	0,2	1	3d16+2d12	500	390	500					340	340			700	380	180	120	
			V4E.0	0,255	0,68	3d16+2d12	500	390	500					280	280			600	290	120	100	
			VA1.1	0,25	1	7d16+4d10	500	410	370	320	370	410	500	320	210	210	320	600	290	120	100	
			VB'1.1	0,2	0,7	6d16+2d12	500	430	390	390	430	500		300	300			700	380	180	120	
			VB1.1	0,2	0,7	6d16+2d12	500	430	390	390	430	500		300	300			700	380	180	120	
			V9C.1	0,2	1	5d16+2d12	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			VF1.1	0,2	1	5d16+2d12	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			V8A.1	0,2	1	5d16+2d12	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			VF6.1	0,2	1	4d16+3d16	500	400	400	500				340	300	340		700	380	180	120	
			V3E.1	0,2	1,71	5d12	530	410	380	410	530							700	380	180	120	
			V6E.1	0,2	1,71	5d12	530	410	380	410	530							700	380	180	120	
			VE3.1	0,2	1,71	5d16	530	410	380	410	530							700	380	180	120	
			V1A.1	0,2	1	6d16	500	430	390	390	430	500						700	380	180	120	
			VG3.1	0,2	1,21	3d16+2d12	500	390	500					340	340			700	380	180	120	
			V3F.1	0,2	0,81	4d12	530	390	390	530								700	380	180	120	
			V6F.1	0,2	0,81	4d12	530	390	390	530								700	380	180	120	
			VA2.1	0,2	0,9	6d10	530	440	400	400	440	530						700	380	180	120	
			VC8.1	0,2	1,35	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
	2	R90	VA1.2	0,2	1,9	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			VF1.2	0,2	2,22	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			Vinv1A.2	0,2	1,315	5d16+2d12	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			VB1.2	0,2	0,8	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
			VB'1.2	0,2	0,8	4d16+2d12	500	400	400	500				340	340			700	380	180	120	
			V3E.2	0,2	2,22	5d12	530	410	380	410	530							700	380	180	120	
			VE3.2	0,2	2,22	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120	
			VGE.2	0,2	2,22	5d12	530	410	380	410	530							700	380	180	120	
VF6.2			0,2	2,22	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120		
Vinv9C.2			0,2	1,315	5d16+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120		
3	R90	V9A.2	0,2	2,22	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120		
		V8A.2	0,2	2,22	5d12+2d10	500	450	380	450	500			340	340			700	380	180	120		
		VB1.3	0,2	0,68	4d16	500	400	400	500								700	380	180	120		
		VB'1.3	0,2	0,68	4d16	500	400	400	500								700	380	180	120		

C **RESULTADOS DO CÁLCULO DAS VIGAS DO EDIFÍCIO EM ESTUDO**

Neste Anexo são apresentados os Quadros de resultados completos da verificação das vigas em estudo no Capítulo 5.

Vigas										Métodos Tabelados		Método da Isotérmica 500°C							Método das Zonas						
Edifício	Piso	Viga	Parte	Vão (m)	B (m)	h (m)	Armadura superior	Armadura inferior	Estribos	Resultado	Resultado	Mrd.fi (KN.m)	Med.fi (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a500 (mm)	Resultado	Mrd.fi (KN.m)	Med.fi (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	az (mm)	
Torre	0	Vernab1.0 V38.0	1	3,6	0,8	0,45	4612	5616+4412	Ø8/(0,150+0,200)	OK	OK	268.284	176.188	0,0494	0,0253	0,000526	30	OK	267.268	176.188	0,0531	0,0232	0,0232	54.166	
			2	6,8	0,8	0,45	4612	5616+4412	Ø8/(0,150+0,200)	OK	OK	268.284	168.392	0,0494	0,0253	0,000526	30	OK	267.268	168.392	0,0531	0,0232	0,0232	54.166	
			1	6	0,8	0,45	4612	7012+3616	Ø8/(0,200+0,200)	OK	OK	267.914	163.546	0,0493	0,0253	0,000521	30	OK	266.902	163.546	0,0530	0,0233	0,000730	54.166	
			2	6	0,8	0,45	4612	7012+3616	Ø8/(0,200+0,200)	OK	OK	267.914	163.546	0,0493	0,0253	0,000521	30	OK	266.902	163.546	0,0530	0,0233	0,000730	54.166	
		1	2,7	0,5	0,3	4612	5612	Ø8/(0,200)	OK	OK	63.913	42.795	0,0285	0,0278	-0,00188	30	OK	63.831	42.795	0,0293	0,0269	-0,00173	36.111		
		1	Vernab1.0 V38.0	1	1,6	0,3	1,9	4612	5612	Ø8/(0,150 + Ø8/(0,300)	OK	OK	452.582	332.557	0,0634	0,0988	0,00107	32	OK	452.320	332.557	0,0661	0,0947	0,00117	35.750
				1	7,2	0,2	1,4	3616	5616	Ø8/(0,150 + Ø8/(0,300)	OK	OK	574.090	423.589	0,0518	0,0879	0,000392	35	OK	574.019	423.589	0,0531	0,0856	0,000470	36.625
				2	3	0,2	1,4	3616	5616	Ø8/(0,150)	OK	OK	574.090	425.625	0,0518	0,0879	0,000392	35	OK	574.019	425.625	0,0531	0,0856	0,000470	36.625
				1	3	0,2	0,6	3616	5616	Ø8/(0,200)	OK	OK	225.047	166.608	0,0518	0,0339	0,000392	35	OK	224.975	166.608	0,0531	0,0329	0,000470	36.625
			1	3,4	0,8	0,45	2612	3616	Ø8/(0,150)	OK	OK	105.330	73.671	0,0188	0,0713	-0,00465	30	OK	105.182	73.671	0,0203	0,0661	-0,00408	54.166	
	2		Vernab1.0 V38.0	1	6	0,3	0,5	2612	4612	Ø8/(0,200)	OK	OK	83.068	60.684	0,0497	0,0285	0,000405	32	OK	82.913	60.684	0,0518	0,0272	0,000530	35.750
				1	4,5	0,3	0,6	4612	6620	Ø8/(0,200)	OK	OK	424.250	292.902	0,172	0,00772	0,00260	32	OK	422.398	292.902	0,179	0,00727	0,00264	35.750
				1	3,8	0,2	0,95	2612	3612	Ø8/(0,150)	OK	OK	76.856	95.359	0,0519	0,0575	0,000537	36	OK	76.843	95.359	0,0431	0,0699	0,000669	28.816
				2	2,3	0,2	0,95	2612	3612	Ø8/(0,150)	OK	OK	76.856	95.875	0,0519	0,0575	0,000537	36	OK	76.843	95.875	0,0431	0,0699	0,000669	28.816
			4	3,8	0,2	0,95	2616	2020+2616	Ø8/(0,150)+Ø8/(0,200)	OK	OK	248.180	270.811	0,184	0,0136	0,00246	36	OK	251.799	270.812	0,153	0,0171	0,00249	28.816	
		5	2,3	0,2	0,95	2616	2020+2616	Ø8/(0,150)+Ø8/(0,200)	OK	OK	248.180	271.128	0,184	0,0136	0,00246	36	OK	251.799	271.128	0,153	0,0171	0,00249	28.816		
		1	3,4	0,1	1,65	2612	3612	Ø8/(0,150 + Ø8/(0,200)	OK	OK	136.797	171.562	0,0699	0,0769	0,00129	36	OK	137.449	171.562	0,0497	0,109	0,000406	24.281		
		3	Vernab1.0 V38.0	1	2,7	0,3	0,35	3612+2616	3612+2616	Ø8/(0,200)	OK	OK	89.731	64.856	0,0630	0,0134	0,00105	31	OK	89.848	65.342	0,0674	0,0124	0,00131	38.977
				1	3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750
				2	3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750
	3			3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750	
	4		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	5		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	6		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	7		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	8		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	9		3	0,3	1,09	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100 + Ø8/(0,150) + Ø8/(0,200)	OK	OK	1235.68	829.603	0,0699	0,0485	0,000972	32	OK	1235.37	829.602	0,0728	0,0464	0,00107	35.750		
	4	Vernab1.0 V38.0	1	6	0,3	1,09	3612+2610	6612+4610	Ø8/(0,200 + Ø8/(0,300) + Ø8/(0,400)	OK	OK	465.818	320.287	0,0783	0,0432	0,00153	32	OK	465.434	320.287	0,0816	0,0413	0,00161	35.750	
			2	6	0,3	1,09	3612+2610	6612+4610	Ø8/(0,200 + Ø8/(0,300) + Ø8/(0,400)	OK	OK	465.818	320.287	0,0783	0,0432	0,00153	32	OK	465.434	320.287	0,0816	0,0413	0,00161	35.750	
			1	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
			2	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
		3	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		4	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		5	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		6	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		7	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		8	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
	9	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750			
	5	Vernab1.0 V38.0	1	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
			2	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
			3	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
			4	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750	
		5	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		6	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		7	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		8	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
		9	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750		
10		3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32	OK	1123.60	754.477	0,0728	0,0421	0,00107	35.750			
6	Vernab1.0 V38.0	1	3	0,3	1	4625+2620	4625+2620	Ø8/(0,100)	OK	OK	1123.91	754.477	0,0699	0,044	0,000972	32									

Vigas										Métodos Tabelados		Método da Isotérmica 500°C						Método das Zonas							
Edifício	Piso	Viga	Parte	Vão (m)	b (m)	h (m)	Armadura a superior	Armadura a inferior	Estribos	Resultado	Resultado	Mrd,fi (KN.m)	Med,fi (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a500 (mm)	Resultado	Mrd,fi (KN.m)	Med,fi (KN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	az (mm)	
Nave	0	V6A.0	1	6	0,2	0,6	4d12	4d16+2d12	d8/0,150	OK	OK	242.231	170.168	0.0941	0.0171	0.00186	35	OK	242.237	170.339	0.0965	0.0166	0.00190	36.625	
			1	6	0,2	0,5	3d12	4d12	d6/0,200	KO	OK	81.532	61.615	0.0701	0.0192	0.00140	35	OK	81.783	61.907	0.0719	0.0187	0.00145	36.625	
			1	4,75	0,25	0,8	4d16	5d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	326.811	231.026	0.0151	0.170	-0.00713	32	OK	326.796	231.026	0.0157	0.163	-0.00670	35.750	
			2	2,5	0,25	0,8	4d16	5d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	326.811	231.390	0.0151	0.170	-0.00713	32	OK	326.796	231.390	0.0157	0.163	-0.00670	35.750	
		V6A.0	1	2,5	0,15	1,95	2d12	3d12	d8/0,150 + d10/0,150	KO	KO	163.044	204.507	0.0519	0.124	0.000402	36	KO	163.688	205.023	0.0431	0.151	-0.0000690	28.016	
			1	6	0,7	0,3	7d16	7d20	d8/0,200(4r)	OK	OK	237.497	147.361	0.0820	0.00724	0.00153	30	OK	237.036	149.212	0.0812	0.00736	0.00160	50.555	
		V6B.0	1	6	0,3	1,2	2d12+3d16	5d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	518.064	361.418	0.0338	0.115	-0.00125	31	OK	518.251	360.913	0.0778	0.0483	0.00152	37.720	
			1	6	0,3	1,2	2d12+3d16	5d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	518.064	361.418	0.0338	0.115	-0.00125	31	OK	518.251	360.913	0.0778	0.0483	0.00152	37.720	
		V6C.1	1	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.529	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.529	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
		V6D.1	1	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.529	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.529	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
	1 e 2	V6E.1/2	1	6	0,3	1,2	4d12	4d16+2d12	d8/0,150(2r)	OK	OK	533.933	371.205	0.0523	0.0737	0.000558	31	OK	533.620	371.205	0.0554	0.0693	0.000724	37.720	
			1	6	0,5	0,3	4d16+3d12	4d20+3d20	d8/0,150(2r)	OK	OK	225.914	148.359	0.0729	0.00858	0.00129	30	OK	225.378	148.359	0.0750	0.00825	0.00135	36.111	
		V6F.1	1	6	0,2	0,4	3d12	4d12	d6/0,200	KO	OK	62.834	47.337	0.0701	0.0143	0.00140	35	OK	62.305	47.077	0.0719	0.0138	0.00135	36.625	
			2	6	0,2	0,4	3d12	4d12	d6/0,200	KO	OK	62.834	47.337	0.0701	0.0143	0.00140	35	OK	62.305	47.077	0.0719	0.0138	0.00135	36.625	
			3	6	0,2	0,4	3d12	4d12	d6/0,200	KO	OK	62.834	47.337	0.0701	0.0143	0.00140	35	OK	62.305	47.077	0.0719	0.0138	0.00135	36.625	
			4	6	0,2	0,4	3d12	4d12	d6/0,200	KO	OK	62.834	47.337	0.0701	0.0143	0.00140	35	OK	62.305	47.077	0.0719	0.0138	0.00135	36.625	
		V6G.1	1	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	340.669	229.537	0.0925	0.0174	0.00176	30	OK	339.343	229.537	0.0928	0.0163	0.00185	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	340.669	229.537	0.0925	0.0174	0.00176	30	OK	339.343	229.537	0.0928	0.0163	0.00185	39.155	
			3	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	340.669	229.537	0.0925	0.0174	0.00176	30	OK	339.343	229.537	0.0928	0.0163	0.00185	39.155	
			4	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	340.669	229.537	0.0925	0.0174	0.00176	30	OK	339.343	229.537	0.0928	0.0163	0.00185	39.155	
		V6H.1	1	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			3	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			4	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
		V6I.1	1	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			3	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			4	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
		V6J.1	1	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			3	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
			4	6	0,4	0,6	2d16	4d16+3d16	d8/0,150(2r)	OK	OK	343.743	233.110	0.0674	0.0252	0.00111	30	OK	343.039	233.110	0.0712	0.0237	0.00124	39.155	
		1 e 2	V6L.1/2	1	6	0,4	0,6	2d20	5d20	d8/0,150	OK	OK	398.522	258.775	0.0672	0.0252	0.00100	30	OK	397.821	258.775	0.0710	0.0236	0.00113	39.155
				1	6	0,4	0,6	2d20	3d25+3d20	d8/0,150	OK	OK	601.881	382.962	0.131	0.0111	0.00222	30	OK	600.375	383.713	0.138	0.0103	0.00229	39.155
			V6M.1	1	2,4	0,15	1,95	2d12	3d12	d8/0,150 + d10/0,150	KO	KO	163.044	204.507	0.0519	0.124	0.000402	36	KO	163.504	204.804	0.0431	0.150	-0.000231	28.016
				1	6	0,3	1,2	5d16	5d16	d8/0,100 + d9/0,150	OK	OK	516.866	358.960	0.0919	0.0404	0.00174	31	OK	515.902	358.960	0.0974	0.0379	0.00184	37.720
	V6N.1		2	6	0,3	1,2	5d16	5d16	d8/0,100 + d8/0,150	OK	OK	516.866	358.960	0.0919	0.0404	0.00174	31	OK	515.902	358.960	0.0974	0.0379	0.00184	37.720	
			1	6	0,4	0,3	4d12	5d20	d8/0,150	OK	OK	166.987	106.502	0.0802	0.00749	0.00157	30	OK	165.991	106.502	0.0847	0.00690	0.00168	39.155	
	V6O.1		1	6	0,4	0,6	2d20	5d20	d8/0,150	OK	OK	398.522	258.775	0.0672	0.0252	0.00100	30	OK	397.821	258.775	0.0710	0.0236	0.00113	39.155	
			2	6	0,4	0,6	2d20	5d20	d8/0,150	OK	OK	398.522	258.775	0.0672	0.0252	0.00100	30	OK	397.821	258.775	0.0710	0.0236	0.00113	39.155	
	V6P.1		1	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.107	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
			1	6	0,4	0,6	2d20	4d20	d8/0,150	OK	OK	318.815	208.107	0.0441	0.0402	-0.000303	30	OK	318.513	208.107	0.0466	0.0378	-0.0000988	39.155	
	V6Q.1/2	1	6	0,4	0,6	2d20	5d20	d8/0,150	OK	OK	398.522	258.775	0.0672	0.0252	0.00100	30	OK	397.821	258.775	0.0710	0.0236	0.00113	39.155		
		1	6	0,4	0,6	2d20	5d20	d8/0,150	OK	OK	398.522	258.775	0.0672	0.0252	0.00100	30	OK	397.821	258.775	0.0710	0.0236	0.00113	39.155		

Vigas										Métodos Tabelados		Método da Isotérmica 500°C							Método das Zonas						
Edifício	Piso	Viga	Parte	Va o (m)	b (m)	h (m)	Armadura superior	Armadura inferior	Estribos	Resultado	Resultado	Med.f (kN.m)	Med.f (kN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	a500 (mm)	Resultado	Med.f (kN.m)	Med.f (kN.m)	x (m)	Ext. Inf (m)	Ext. Sup (m)	az (mm)	
Piso 0	V3F.0	V3F.0	1	4	0,2	0,5	3612	4612	46/0,200	OK	OK	81.914	62.235	0,0701	0,0193	0,00140	35	OK	81.783	62.235	0,0719	0,0187	0,00145	36,625	
			1	3,8	0,2	0,5	3612	4612	46/0,200	OK	OK	81.914	62.261	0,0701	0,0193	0,00140	35	OK	81.783	62.261	0,0719	0,0187	0,00145	36,625	
		V3F.0 Vento45.0	1	6,5	0,7	0,3	11612	5616	48/0,200(6)	OK	OK	111.372	72.887	0,0340	0,0225	-0,00101	30	OK	110.964	72.887	0,0364	0,0209	-0,000729	50,555	
			1	3,5	0,5	0,3	4616+3612	4620+3620	48/0,250	OK	OK	225.914	149.585	0,0729	0,00858	0,00129	30	OK	225.378	149.585	0,0750	0,00825	0,00135	36,111	
		V3F.0 Vento45.0	1	4,8	0,2	0,7	5616+2620	4616+3616	46/0,200(2)	OK	OK	406.990	279.330	0,0603	0,0345	0,000946	35	OK	406.623	279.076	0,0618	0,0336	0,00101	36,625	
			1	5	0,2	0,7	3612+2620+268	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	387.235	271.881	0,188	0,00868	0,00268	35	OK	386.291	271.881	0,192	0,00838	0,00270	36,625	
		V3F.0	2	5	0,2	0,7	3612+2620+268	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	387.235	271.881	0,188	0,00868	0,00268	35	OK	386.291	271.881	0,192	0,00838	0,00270	36,625	
			1	5,6	0,1	1	3616+2612+268	4616+2612	48/0,100+4 8/0,200	OK	OK	431.510	303.649	0,0651	0,0478	0,00102	35	OK	431.397	303.649	0,0668	0,0465	0,00109	36,625	
		V3F.0	2	5,6	0,1	1	3616+2612+268	4616+2612	48/0,100+4 8/0,200	OK	OK	431.510	303.649	0,0651	0,0478	0,00102	35	OK	431.397	303.649	0,0668	0,0465	0,00109	36,625	
			1	3,2	0,2	1	3616+2612+268	4616+2612	48/0,100+4 8/0,200	OK	OK	431.510	303.996	0,0651	0,0478	0,00102	35	OK	431.397	303.996	0,0668	0,0465	0,00109	36,625	
		V3F.0	2	3,2	0,2	1	3616+2612+268	4616+2612	48/0,100+4 8/0,200	OK	OK	431.510	303.996	0,0651	0,0478	0,00102	35	OK	431.397	303.996	0,0668	0,0465	0,00109	36,625	
			1	2,5	0,3	8,7	3616+2612+268	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	409.622	281.571	0,0983	0,0197	0,00186	32	OK	408.417	281.571	0,102	0,0188	0,00192	35,750	
		V3F.0	2	2,5	0,3	8,7	3616+2612+268	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	409.622	281.571	0,0983	0,0197	0,00186	32	OK	408.417	281.571	0,102	0,0188	0,00192	35,750	
			1	3,8	0,2	1,7	2612	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	875.003	631.740	0,167	0,0310	0,00258	35	OK	874.252	631.740	0,172	0,0301	0,00260	36,625	
		V3F.0	2	3,8	0,2	1,7	2612	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	875.003	631.740	0,167	0,0310	0,00258	35	OK	874.252	631.740	0,172	0,0301	0,00260	36,625	
			1	1,9	0,2	1	3616+2612	3616+2612	68/0,200(2)	OK	OK	339.187	245.024	0,0264	0,1227	-0,00257	35	OK	339.168	245.024	0,0271	0,119	-0,00242	36,625	
		V3F.0	2	1,9	0,2	1	3616+2612	3616+2612	68/0,200(2)	OK	OK	339.187	245.024	0,0264	0,1227	-0,00257	35	OK	339.168	245.024	0,0271	0,119	-0,00242	36,625	
			1	5,4	0,3	0,68	2616	3616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	223.067	160.027	0,0432	0,0479	-0,000225	32	OK	222.903	160.027	0,0456	0,0452	-0,000208	37,180	
		V3F.0	2	5,4	0,3	0,68	2616	3616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	223.067	160.027	0,0432	0,0479	-0,000225	32	OK	222.903	160.027	0,0456	0,0452	-0,000208	37,180	
			1	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
		V3F.0	2	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
			1	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
		V3F.0	4	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
			5	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
		V3F.0	6	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
			7	6	0,3	1	3616+2612+268	7616+4610	68/0,100+4 8/0,100	OK	OK	734.118	499.042	0,137	0,0208	0,00232	32	OK	732.523	498.757	0,143	0,0198	0,00237	35,750	
		V3F.0	1	4,8	0,2	8,7	6616+2612	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	398.006	278.442	0,137	0,0131	0,00232	35	OK	397.503	278.442	0,140	0,0127	0,00235	36,625	
			1	4,8	0,2	8,7	6616+2612	6616+2612	68/0,100+4 8/0,200	OK	OK	398.006	278.442	0,137	0,0131	0,00232	35	OK	397.503	278.442	0,140	0,0127	0,00235	36,625	
		V3F.0	1	1,8	0,2	1	3616	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	501.363	361.494	0,0953	0,0315	0,00181	35	OK	501.121	361.494	0,0977	0,0306	0,00185	36,625	
			1	6	0,2	1	2616	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	498.269	358.832	0,133	0,0215	0,00225	35	OK	497.780	358.832	0,137	0,0208	0,00237	36,625	
		V3F.0	2	6	0,2	1	2616	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	498.269	358.832	0,133	0,0215	0,00225	35	OK	497.780	358.832	0,137	0,0208	0,00237	36,625	
			1	5,3	0,2	1	2616	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	496.768	357.874	0,133	0,0214	0,00229	35	OK	501.121	361.051	0,0977	0,0306	0,00185	36,625	
		V3F.0	2	3,5	0,2	1	2616	5616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	496.768	358.169	0,133	0,0214	0,00229	35	OK	501.121	361.346	0,0977	0,0306	0,00185	36,625	
			1	6	0,2	1	3616	5616+2616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	576.828	409.315	0,129	0,0223	0,00225	35	OK	576.384	409.315	0,132	0,0217	0,00228	36,625	
		V3F.0	2	6	0,2	1	3616	5616+2616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	576.828	409.315	0,129	0,0223	0,00225	35	OK	576.384	409.315	0,132	0,0217	0,00228	36,625	
			1	3	0,2	1	3616	5616+2616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	576.828	409.315	0,129	0,0223	0,00225	35	OK	576.384	409.315	0,132	0,0217	0,00228	36,625	
		V3F.0	1	1,5	0,3	1,71	5612	5612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	398.628	296.494	0,0887	0,0621	0,00176	35	OK	398.418	296.494	0,0910	0,0604	0,00180	36,625	
			1	1,5	0,3	1,71	5612	5612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	398.628	296.494	0,0887	0,0621	0,00176	35	OK	398.418	296.494	0,0910	0,0604	0,00180	36,625	
		V3F.0	1	6	0,2	1,71	3616	5616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	709.345	525.831	0,0518	0,108	0,000392	35	OK	709.273	525.831	0,0531	0,106	0,000470	36,625	
			2	6	0,2	1,71	3616	5616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	709.345	525.831	0,0518	0,108	0,000392	35	OK	709.273	525.831	0,0531	0,106	0,000470	36,625	
		V3F.0	1	6	0,2	1,71	3616	5616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	709.345	525.831	0,0518	0,108	0,000392	35	OK	709.273	525.831	0,0531	0,106	0,000470	36,625	
			1	6	0,2	1	3616	6616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	497.541	353.484	0,0930	0,0320	0,00178	35	OK	497.306	353.484	0,0962	0,0311	0,00182	36,625	
		V3F.0	2	6	0,2	1	3616	6616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	497.541	353.484	0,0930	0,0320	0,00178	35	OK	497.306	353.484	0,0962	0,0311	0,00182	36,625	
			1	6	0,2	1	3616	6616	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	497.541	353.484	0,0930	0,0320	0,00178	35	OK	497.306	353.484	0,0962	0,0311	0,00182	36,625	
		V3F.0	2	6	0,2	1,21	2612	3616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	416.419	299.749	0,0889	0,0376	0,00194	35	OK	416.158	299.749	0,101	0,0366	0,00198	36,625	
			2	6	0,2	1,21	2612	3616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	416.419	299.749	0,0889	0,0376	0,00194	35	OK	416.158	299.749	0,101	0,0366	0,00198	36,625	
V3F.0	2	6	0,2	1,21	2612	3616+2612	68/0,200+4 8/0,250	OK	OK	416.419	299.749	0,0889	0,0376	0,00194	35	OK	416.158	299.749	0,101	0,0366	0,00198	36,625			
	1	3,8	0,2	0,81	2612	4612	48/0,250	OK	OK	140.626	107.108	0,0712	0,0341	0,00133	35	OK	140.4								