



Universidade de Aveiro
Ano 2022

**Catarina Castro
Araújo**

**CÁLCULO AO FOGO DE ESTRUTURAS DE BETÃO –
PROGRAMA DE CÁLCULO SIMPLIFICADO**



Universidade de Aveiro
Ano 2022

**Catarina Castro
Araújo**

CÁLCULO AO FOGO DE ESTRUTURAS DE BETÃO – PROGRAMA DE CÁLCULO SIMPLIFICADO

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Miguel Ângelo Carvalho Ferraz
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Chegada esta fase final de estudos, não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que estiveram presentes e me acompanharam durante toda esta fase da minha vida:

Aos docentes, não docentes e auxiliares por toda a simpatia, ajuda e orientação.

Ao meu orientador, professor Paulo Cachim, pela sua disponibilidade, incentivo, compreensão e ajuda, que contribuíram para o aperfeiçoamento de todo o trabalho realizado.

À minha família pelo incentivo, companheirismo e pela oportunidade de poder chegar até este momento.

A todos o meu MUITO OBRIGADO!

palavras-chave

estruturas de betão, resistência ao fogo, elementos estruturais, cálculo tabelado, cálculo simplificado, Eurocódigo 2 parte1-2, programação orientada a objetos.

resumo

A ação do fogo é uma das ações acidentais que mais afeta a estrutura de um edifício, proporcionando a sua instabilidade e conseqüente colapso, o que conduz à perda de vidas e a custos elevados de reparação.

A resistência das estruturas ao fogo deverá ser tida em conta aquando do dimensionamento de um edifício. Para isso, foi desenvolvido o programa XD-Fire (*Xpress Design concrete sections under Fire Loading*) que permite verificar a resistência ao fogo de elementos isolados de betão armado que constituem a estrutura do edifício.

Desenvolvido com a linguagem de programação C#, este programa apresenta uma interface gráfica que permite a introdução de dados de forma rápida e fácil, apresentando classes pré-inseridas das quais o utilizador poderá escolher ou, caso o pretenda, poderá introduzir uma nova classe que não se encontre pré-introduzida ou criada por si. Este encontra-se ainda munido de um manual de cálculo (onde se encontram conceitos teóricos e os respetivos métodos de cálculo) e, um manual de utilizador (que descreve como utilizar o programa e o que o utilizador poderá encontrar em cada secção).

O XD-Fire permite efetuar a verificação da resistência ao fogo nos seguintes elementos estruturais: laje, viga, pilar, parede e elementos tracionados. Esta verificação poderá ser efetuada por dois métodos de cálculo, tabelado e simplificado.

Este programa tem por base a nova EN 1992-1-2 parte 1-2 de 2020 (que ainda não se encontra em uso nem traduzida em Portugal), podendo este programa ser considerado um pioneiro na verificação da resistência ao fogo.

Esta dissertação apresenta ainda conceitos teóricos presentes na EN 1992-1-2 de 2020 e alguns exemplos práticos resolvidos com a ajuda do programa XD-Fire.

keywords

concrete structures, fire resistance, structural elements, tabulated calculation, simplified calculation, eurocode 2 part 1-2, object oriented programming.

abstract

The action of fire is one of the accidental actions that most affects the structure of a building, causing its instability and consequent collapse, which leads to loss of life and high repair costs.

The resistance of structures to fire must be taken into account when designing a building. For this, the XD-Fire (*Xpress Design concrete sections under Fire Loading*) program was developed, which allows checking the fire resistance of isolated reinforced concrete elements that make up the structure of the building. Developed with the C# programming language, this program features a graphic interface that allows the introduction of data quickly and easily, presenting pre-inserted classes from which the user can choose or, if he so wishes, he can introduce a new class that does not is pre-entered or created by you. It is also equipped with a calculation manual (where theoretical concepts and the respective calculation methods are found) and a user manual (describing how to use the program and what the user can find in each section).

XD-Fire allows checking the fire resistance of the following structural elements: slab, beam, column, wall and tensile elements. This verification can be carried out by two calculation methods, tabulated and simplified.

This program is based on the new EN 1992-1-2 part 1-2 of 2020 (which is not yet in use or translated in Portugal), and this program can be considered a pioneer in the verification of fire resistance.

This dissertation also presents theoretical concepts present in EN 1992-1-2 of 2020 and some practical examples solved with the help of the XD-Fire program.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação	2
2. Enquadramento Teórico	4
2.1. Definição do fogo e dos seus elementos.....	4
2.2. Classes de fogos	6
2.3. Desenvolvimento do fogo.....	6
2.4. Modelação do fogo	7
2.4.1. Curvas de incêndio nominais.....	8
2.4.2. Curvas de incêndio paramétricas	9
2.5. Consequências do fogo.....	10
2.6. Sistemas de combate ao fogo.....	11
2.6.1. Sistemas passivos	11
2.6.2. Sistemas ativos	12
2.7. Reabilitação de edifícios danificados	12
3. Legislação em Vigor em Portugal	13
3.1. Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios.....	13
3.2. Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios	17
3.3. Eurocódigo	18
3.3.1. Eurocódigo 1 parte 1-2	19
3.3.2. Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010 vs Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2020	19
4. Métodos de Cálculo Segundo a EN 1992-1-2 parte 1-2 de 2020	21
4.1. Método de Cálculo Tabelado.....	23
4.1.1. Pilar.....	27
4.1.1.1. Método A.....	28
4.1.1.2. Método B	33
4.1.2. Parede	34
4.1.2.1. Parede de compartimentação não resistente	34
4.1.2.2. Parede resistente maciça.....	34
4.1.3. Elementos Tracionados.....	38
4.1.3.1. Propriedades térmicas: betão	39
4.1.3.2. Propriedades mecânicas: betão	41
4.1.3.3. Propriedades mecânicas: aço para betão armado	43
4.1.4. Vigas.....	45
4.1.4.1. Simplesmente apoiada	46
4.1.4.2. Contínua	47
4.1.4.3. Todas as faces expostas ao fogo	49
4.1.5. Lajes	50

4.1.5.1.	Maciça simplesmente apoiada.....	51
4.1.5.2.	Maciça contínua.....	52
4.1.5.3.	Fungiforme	52
4.1.5.4.	Nervurada	53
4.2.	Método de Cálculo Simplificado.....	55
4.2.1.	Perfis de temperatura	56
4.2.1.1.	Uma face exposta ao fogo	57
4.2.1.2.	Duas faces expostas ao fogo.....	57
4.2.1.3.	Três faces expostas ao fogo.....	59
4.2.1.4.	Quatro faces expostas ao fogo.....	60
4.2.1.5.	Secção transversal circular exposta ao fogo.....	60
4.2.2.	Lajes	61
4.2.3.	Vigas.....	63
4.2.4.	Pilares	65
4.2.5.	Parede	68
5.	Linguagem de Programação.....	70
5.1.	Linguagem C#	70
5.2.	.NET Core.....	70
5.3.	Programação orientada a objetos (POO)	71
6.	Programa XD-Fire.....	73
6.1.	Janela inicial do XD-Fire.....	73
6.2.	Barra de menus	74
6.2.1.	Novo	74
6.2.2.	Abrir	74
6.2.3.	Guardar	75
6.2.4.	Imprimir.....	75
6.2.5.	Sair.....	75
6.2.6.	Ajuda	75
6.2.7.	Elemento em análise	76
6.3.	Cálculo Tabelado.....	76
6.3.1.	Janela de introdução de dados	77
6.3.1.1.	Materiais	78
6.3.1.2.	Ações e coeficientes	79
6.3.1.3.	Geometria	79
6.3.2.	Janelas de resultados.....	81
6.3.2.1.	Orientação da armadura principal.....	81
6.3.2.2.	Verificação das dimensões mínimas	82
6.3.2.3.	Tensão no aço	83
6.3.2.4.	Temperatura critica da armadura.....	83
6.3.2.5.	Ajuste da distância mínima ao eixo.....	83
6.3.2.6.	Ajuste da largura mínima	85
6.3.2.7.	Verificação das condições mínimas	85

6.3.2.8.	Forças	86
6.3.2.9.	Dimensões e verificação das condições mínimas.....	86
6.3.2.10.	Cálculo da resistência ao fogo – 4 lados expostos ao fogo	87
6.3.2.11.	Relação entre a altura e a espessura da parede	87
6.3.2.12.	Betão – propriedades térmicas.....	88
6.3.2.13.	Betão – propriedades mecânicas.....	88
6.3.2.14.	Aço – propriedades mecânicas	89
6.4.	Cálculo Simplificado	89
6.4.1.	Janela de introdução de dados	90
6.4.1.1.	Materiais	91
6.4.1.2.	Geometria da secção	92
6.4.1.3.	Armadura	92
6.4.1.4.	Ações e coeficientes	95
6.4.2.	Janelas de resultados.....	95
6.4.2.1.	Secção reduzida	96
6.4.2.2.	Betão.....	97
6.4.2.3.	Armadura	97
6.4.2.4.	Armadura superior.....	99
6.4.2.5.	Armadura inferior	100
6.4.2.6.	Forças e distâncias	100
6.4.2.7.	Momentos	107
6.4.2.8.	Verificação de segurança.....	108
6.5.	Convenção de eixos e sinais	108
7.	Exemplos Práticos	109
7.1.	Exemplo 1 – Verificação da resistência ao fogo de uma laje.....	109
7.1.1.	Método de cálculo tabelado.....	109
7.1.2.	Método de cálculo simplificado	111
7.2.	Exemplo 2 – Verificação da resistência ao fogo de uma parede.....	113
7.2.1.	Método de cálculo tabelado.....	114
7.2.2.	Método de cálculo simplificado	116
7.3.	Exemplo 3 – Verificação da resistência ao fogo de uma viga.....	118
7.3.1.	Método de cálculo tabelado.....	119
7.3.2.	Método de cálculo simplificado	121
7.4.	Exemplo 4 – Verificação da resistência ao fogo de um pilar	124
7.4.1.	Método de cálculo tabelado.....	125
7.4.2.	Método de cálculo simplificado	127
7.5.	Exemplo 5 – Verificação da resistência ao fogo de um elemento tracionado	
	130	
7.5.1.	Método de cálculo tabelado.....	130
8.	Considerações Finais	133
8.1.	Conclusões.....	133
8.2.	Trabalhos Futuros	133

9. Referências Bibliográficas	134
ANEXOS	136

Índice de Figuras

Figura 1.	Triângulo do fogo.	5
Figura 2.	Curva de incêndio natural. Traduzido de Khoury et al., 2007.....	7
Figura 3.	Curvas de incêndio nominais.....	9
Figura 4.	Exemplo de curvas paramétricas. Traduzido de Khoury et al. (2007).	10
Figura 5.	Dimensões da secção transversal usadas nas tabelas do método de cálculo tabelado. Retirado de CEN (2020).	24
Figura 6.	Dimensões para o cálculo de a_m . Retirado de IPQ (2010c).....	24
Figura 7.	Comprimento efetivo de um pilar em situação de incêndio, $l_{0,fi}$, para estruturas contraventadas. Retirado de CEN (2020)	28
Figura 8.	Diagrama de tensões-extensões do betão a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).....	41
Figura 9.	Diagrama de tensões-extensões do aço para betão armado a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).	44
Figura 10.	Formulas para a relação tensão-extensão do aço para betão armado a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).....	44
Figura 11.	Laje de betão armado com isolamento acústico e revestimentos. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	50
Figura 12.	Zona danificada de uma secção transversal exposta ao fogo. Retirado de CEN (2020).	56
Figura 13.	Sistema de coordenadas para secções transversais com duas faces expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	58
Figura 14.	Sistema de coordenadas para os cantos. Retirado de e traduzido de CEN (2020).	59
Figura 15.	Secção transversal com quatro faces expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	60
Figura 16.	Representação da tensão e deformação na zona comprimida, (a) secção transversal reduzida, (b) distribuição da deformação, (c) distribuição da tensão do betão na zona comprimida, (d) simplificação da distribuição da tensão do betão na zona comprimida e (e) esforços da secção reduzida. Retirado de CEN (2020).....	62

Figura 17.	Representação da tensão e deformação na zona comprimida para $x_{fi} < d_{fi}$, (a) secção transversal reduzida, (b) distribuição da deformação, (c) distribuição da tensão do betão na zona comprimida, (d) simplificação da distribuição da tensão do betão na zona comprimida e (e) esforços da secção reduzida. Retirado de CEN (2020).	66
Figura 18.	Janela inicial do XD-Fire.....	74
Figura 19.	Barra de menus do XD-Fire.....	74
Figura 20.	Sobre o XD-Fire.	76
Figura 21.	Janela de opções para o método de cálculo tabelado.....	77
Figura 22.	Exemplo de uma janela de introdução de dados para o método de cálculo tabelado.	78
Figura 23.	Janela de personalização dos materiais para o cálculo tabelado.	79
Figura 24.	Ilustração das medições para uma laje exposta ao fogo na face superior... ..	79
Figura 25.	Ilustração das medidas para uma laje exposta ao fogo na face inferior.	80
Figura 26.	Ilustração da distância da armadura à face exposta ao fogo, a.	80
Figura 27.	Ilustração das medidas para os diferentes tipos de secção transversal.	80
Figura 28.	Exemplo de uma janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	81
Figura 29.	Resultados possíveis para a secção “Orientação da armadura principal”. .	82
Figura 30.	Exemplo de uma secção de “Verificação das dimensões mínimas” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.....	82
Figura 31.	Exemplo de uma secção de “Tensão no aço” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	83
Figura 32.	Exemplo de uma secção de “Temperatura crítica da armadura” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	83
Figura 33.	Exemplo de uma secção de “Ajuste da distância mínima ao eixo” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	84
Figura 34.	Armadura não exposta ao fogo.....	84

Figura 35.	Armadura exposta ao fogo.....	85
Figura 36.	Exemplo de uma secção “Ajuste da largura mínima” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	85
Figura 37.	Exemplo de uma secção “Verificação das condições mínimas” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	86
Figura 38.	Exemplo de uma secção “Forças” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.	86
Figura 39.	Exemplo de uma secção “Dimensões e verificação das condições mínimas” para o método de cálculo tabelado.....	86
Figura 40.	Exemplo de uma secção “Cálculo da resistência ao fogo - 4 lados expostos ao fogo” para o método de cálculo tabelado.....	87
Figura 41.	Exemplo de uma secção “Relação entre a altura e a espessura da parede” para o método de cálculo tabelado.	87
Figura 42.	Exemplo de uma secção “Betão-Propriedades térmicas” para o método de cálculo tabelado.	88
Figura 43.	Exemplo de uma secção “Betão - Propriedades mecânicas” para o método de cálculo tabelado.	89
Figura 44.	Exemplo de uma secção “Aço -Propriedades mecânicas” para o método de cálculo tabelado.	89
Figura 45.	Janela de opções para o método de cálculo simplificado.	90
Figura 46.	Exemplo de uma janela de introdução de dados para o método de cálculo simplificado.	91
Figura 47.	Janela de personalização dos materiais para o método de cálculo simplificado.	92
Figura 48.	Janela de personalização das armaduras para o método de cálculo simplificado.	93
Figura 49.	Exemplo das secções “Armadura Superior” e “Armadura Inferior” referente à análise a duas faces expostas ao fogo de uma viga para o método de cálculo simplificado.	93
Figura 50.	Exemplo da secção “Armadura” para o método de cálculo simplificado.	95

Figura 51.	Exemplo de uma janela de resultados para o método de cálculo simplificado.	96
Figura 52.	Exemplo de uma secção “Secção reduzida” para o método de cálculo simplificado.	97
Figura 53.	Exemplo de uma secção “Betão” para o método de cálculo simplificado.	97
Figura 54.	Exemplo de uma secção “Armadura” para o método de cálculo simplificado.	98
Figura 55.	Exemplo de uma secção “Armadura” para a análise referente ao elemento estrutural pilar e ao elemento estrutural parede pelo método de cálculo simplificado... ..	99
Figura 56.	Exemplo de uma secção “Armadura Superior” para o método de cálculo simplificado.	100
Figura 57.	Exemplo de uma secção “Armadura Inferior” para o método de cálculo simplificado.	100
Figura 58.	Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural laje pelo método de cálculo simplificado.	101
Figura 59.	Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural viga referente à análise de “Duas faces expostas ao fogo” pelo método de cálculo simplificado.	103
Figura 60.	Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural viga referente às análises de “Três faces expostas ao fogo” e “Quatro faces expostas ao fogo” pelo método de cálculo simplificado.	104
Figura 61.	Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural pilar pelo método de cálculo simplificado.	106
Figura 62.	Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural parede pelo método de cálculo simplificado.	107
Figura 63.	Exemplo de uma secção “Momentos” para o método de cálculo simplificado.	107
Figura 64.	Exemplo de uma secção “Verificação de segurança” com resultado afirmativo para o método de cálculo simplificado.	108
Figura 65.	Exemplo de uma secção “Verificação de segurança” com resultado negativo para o método de cálculo simplificado.	108

Figura 66.	Representação de uma laje exposta ao fogo numa face em corte.....	109
Figura 67.	Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 1).	110
Figura 68.	Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 1).....	111
Figura 69.	Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 1).	112
Figura 70.	Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 1).	113
Figura 71.	Representação de uma parede exposta ao fogo em duas faces em corte....	114
Figura 72.	Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 2).	115
Figura 73.	Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 2).....	116
Figura 74.	Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 2).	117
Figura 75.	Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 2).	118
Figura 76.	Representação de seção transversal de uma viga exposta ao fogo em três faces.	119
Figura 77.	Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 3).	120
Figura 78.	Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 3).....	121
Figura 79.	Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 3).	123
Figura 80.	Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 3).	124
Figura 81.	Representação de seção transversal de um pilar exposto ao fogo em quatro faces.	125

Figura 82.	Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 4).	126
Figura 83.	Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 4).....	127
Figura 84.	Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 4).	129
Figura 85.	Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 4).	130
Figura 86.	Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 5).	131
Figura 87.	Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 5).....	132

Índice de Tabelas

Tabela 1. Denominação das características de resistência ao fogo.	17
Tabela 2. Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios. Retirado de Portaria n.º 135/2020 (2020)	18
Tabela 3. Dimensões mínimas e distâncias dos eixos das armaduras mínimas para um pilar com seção transversal retangular ou circular com quatro faces expostas ao fogo para $l_{o,fi}/l_o=0,5$. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	30
Tabela 4. Dimensões mínimas e distâncias dos eixos das armaduras mínimas para um pilar com uma face expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).	33
Tabela 5. Espessura mínima de uma parede de compartimentação não resistente. Retirado e traduzido de CEN (2020).	34
Tabela 6. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com um lado exposto ao fogo com $l_o \leq 4,5m$ e $l_{o,fi} \leq 2,25m$. Retirado e traduzido de CEN (2020).	36
Tabela 7. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com um lado exposto ao fogo com $l_o \leq 2,5m$ e $l_{o,fi} \leq 1,25m$. Retirado e traduzido de CEN (2020).	36
Tabela 8. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com todos os lados expostos ao fogo com $l_o \leq 4,5m$ e $l_{o,fi} \leq 2,25m$. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	37
Tabela 9. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com todos os lados expostos ao fogo com $l_o \leq 2,5m$ e $l_{o,fi} \leq 1,25m$. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	37
Tabela 10. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	39
Tabela 11. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	47
Tabela 12. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas contínuas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).	48
Tabela 13. Aumento da largura da viga e da espessura da alma para vigas contínuas. Retirado e traduzido de CEN (2020).	49

Tabela 14. Espessura e distâncias mínimas ao eixo de lajes maciças simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	51
Tabela 15. Espessura e distância mínimas ao eixo de lajes fungiformes de betão armado. Retirado e traduzido de (CEN, 2020).	53
Tabela 16. Espessura e distância mínimas ao eixo para lajes nervuradas simplesmente apoiadas, armadas em duas direções, de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).	54
Tabela 17. Espessura e distância mínimas ao eixo para lajes nervuradas simplesmente apoiadas, armadas em duas direções, de betão armado com pelo menos um bordo encastrado. Retirado e traduzido de CEN (2020)	55
Tabela 18. Espessura mínima de um elemento estrutural com uma face exposta ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).....	57
Tabela A. Valores para os parâmetros de relação tensão-extensão para o betão com agregados siliciosos ou calcários a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).	137
Tabela B. Valores para os parâmetros de relação tensão-extensão para aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).	137
Tabela C. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 30 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	138
Tabela D. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 30 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	139
Tabela E. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 60 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	140
Tabela F. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 60 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	141
Tabela G. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 90 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	142

Tabela H. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 90 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	143
Tabela I. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 120 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	144
Tabela J. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 120 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	145
Tabela K. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 180 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	146
Tabela L. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 180 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	147
Tabela M. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 240 e $l_{0,fi}=1,0l_0$. Retirado de CEN (2020).	148
Tabela N. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 240 e $l_{0,fi}=0,7l_0$. Retirado de CEN (2020).	149

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas latinas

A_c	área total de betão
A_c	área total de betão da secção reduzida
A_d	ação accidental
A_s	área total da armadura da secção transversal
A_{si}	área da secção transversal do varão de aço “i”
$A_{s,req}$	área de aço requerido para o estado limite ultimo segundo a EN 1992-1-1
$A_{s,prov}$	área de aço utilizada
$E30$ ou $E60$, ...	classe de resistência ao fogo para o critério de estanquidade durante 30, ou 60... minutos de exposição ao fogo padrão
E_d	valor de cálculo da força ou momento à temperatura ambiente
$E_{d,fi}$	valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio
E_s	módulo de elasticidade do aço
$E_{s,\theta}$	módulo de elasticidade do aço para uma determinada temperatura θ
$F_{cd,fi}$	valor de cálculo da força de compressão no betão em situação de incêndio na direção do eixo longitudinal do elemento
$F_{sd,0,fi}$	força de compressão resistente da armadura longitudinal à distancia do eixo a do lado mais comprimido do pilar
$F_{sd,t,fi}$	a força de tração resistente da armadura longitudinal à distancia do eixo a do lado tracionado do pilar
$F_{sd,c,fi}$	força de compressão resistente da armadura longitudinal à distancia do eixo a do lado menos comprimido do pilar
G	valor característico de uma ação permanente
$I30$ ou $I60$, ...	classe de resistência ao fogo para o critério de isolamento durante 30, ou 60... minutos de exposição ao fogo padrão

$M_{0,Ed,fi}$	valor de cálculo do momento de 1ª ordem em situação de incêndio
M_{Ed}	valor de cálculo do momento fletor à temperatura ambiente
$M_{Ed,fi}$	valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio
$M_{Rd,fi}$	momento fletor resistente em situação de incêndio
N_{Ed}	valor de cálculo do esforço axial à temperatura ambiente
$N_{Ed,fi}$	valor de cálculo do esforço axial normal em situação de incêndio
N_{Rd}	esforço axial resistente à temperatura ambiente
$N_{Rd,fi}$	esforço axial resistente em situação de incêndio
Q	valor característico de uma ação variável
REI, R, EI ou R_{fi}	resistência ao fogo
$R30$ ou $R60, \dots$	classe de resistência ao fogo para o critério de resistência durante 30, ou 60... minutos de exposição ao fogo padrão
$R_{d,t,fi}$	valor de cálculo da resistência em situação de incêndio num dado instante t
$X_{d,\theta}$	valor de cálculo de uma propriedade de resistência ou de deformação em situação de incêndio
X_k	valor característico de uma propriedade de resistência ou de deformação à temperatura ambiente
$X_{k,\theta}$	valor característico de uma propriedade de resistência ou de deformação a uma temperatura θ

Letras minúsculas latinas

a	distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo
a_c	dimensão da zona de canto afetada pela transferência de calor bilateral
a_{eff}	distância efetiva do eixo da armadura à face exposta ao fogo
a_{fi}	distância reduzida do eixo da armadura à face exposta ao fogo
a_i	distância do eixo do varão “i” à face exposta ao fogo

a_m	distância ao eixo média da armadura à face exposta ao fogo
a_{min}	distância mínima da armadura à face exposta ao fogo segundo os quadros da EN 1992-1-2 de 2020, correspondente à resistência ao fogo padrão requerida
a_{sd}	distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo de uma viga com apenas uma única camada de armadura
$a_{tabela\ novo}$	nova distância mínima corrigida da armadura à face exposta ao fogo
a_z	espessura da zona afetada pelo fogo
b	largura ou menor dimensão da secção transversal
b_{fi}	largura reduzida da secção transversal afetada pelo fogo
b_{min}	dimensão mínima da largura da secção transversal segundo os quadros da EN 1992-1-2 de 2020, correspondente à resistência ao fogo padrão requerida
b_{mod}	aumento da largura segundo a EN 1992-1-2 de 2020
$b_{tabela\ novo}$	nova largura mínima tabelada corrigida
b_w	espessura da alma da secção transversal
$b_{w,min}$	espessura mínima da alma de uma secção transversal
c_{mec}	recobrimento mecânico
$c_p(\theta)$	calor específico do betão para uma temperatura θ
$c_{p,peak}$	calor específico máximo do betão
d_{eff}	altura eficaz do banzo inferior de uma secção em “I”
d_{fi}	altura efetiva da secção reduzida
e_d	excentricidade máxima
$f_c(\theta_M)$	tensão máxima de compressão do betão para a temperatura no centro de massa da secção transversal
$f_{c,\theta,20^\circ C}$	valor característico da resistência à compressão após o arrefecimento até à temperatura ambiente

f_{cd}	valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade
f_{ct}	valor característico da resistência à tração do betão
$f_{se,\theta}$	tensão equivalente do aço de reforço para valores de extensão superiores a $\varepsilon_{sp,\theta}$ e inferiores a $\varepsilon_{sy,\theta}$
$f_{sp,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade do aço em função da temperatura
$f_{sy,\theta}$	tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio para uma temperatura θ
f_{yd}	valor de cálculo da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
f_{yk}	valor característico da tensão de cedência à tração do aço das armaduras para betão armado
f_{yki}	tensão característica de cedência do aço à temperatura ambiente para o varão “i”
h_1	espessura da laje de betão
h_2	espessura do isolamento acústico
h_3	espessura do revestimento
h	altura da secção transversal
h_{fi}	altura reduzida da secção transversal afetada pelo fogo
h_s	espessura total de uma laje
$h_{s,min}$	espessura total mínima de uma laje
h_{vi}	altura dos varões de uma viga
h_w	espessura da alma da secção transversal
$h_{w,min}$	espessura mínima da alma da secção transversal
$k_{c,\theta}$	coeficiente de redução da resistência à compressão do betão
$k_{ct,\theta}$	coeficiente de redução da resistência à tração do betão

$k_{se,\theta}$	parâmetro da relação tensão-extensão do aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio a temperaturas elevadas
$k_{X,\theta}$	fator de redução dependente da temperatura para uma propriedade de resistência ou de deformação
l_0	comprimento efetivo de um pilar à temperatura ambiente
$l_{0,fi}$	comprimento efetivo de um pilar em situação de incêndio
l	comprimento de um elemento estrutural
l_x	comprimento do menor vão de uma laje
l_y	comprimento do maior vão de uma laje
n_{sc}	número de varões na zona comprimida
t	tempo de exposição ao fogo
u	teor de humidade
w	dimensão da secção transversal usada para obter a secção transversal reduzida dependendo da exposição ao fogo
$x_{e,fi}$	profundidade efetiva do betão em compressão em situação de incêndio
x_{fi}	profundidade reduzida do betão em compressão em situação de incêndio
y_{fi}	distância do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio
y_i	distância do eixo da secção transversal ao centro do varão na horizontal
y'	distância no eixo horizontal dos cantos com varões expostos ao fogo em dois lados, esta varia entre 0 e a_c
z_i	distância do eixo da secção transversal ao centro do varão na vertical
z'	distância no eixo vertical dos cantos com varões expostos ao fogo em dois lados, esta varia entre 0 e a_c

Letras maiúsculas gregas

Δa	correção associada à temperatura crítica da armadura
------------	--

ΔR_{fi} atraso entre a temperatura do compartimento em fogo e a temperatura da superfície do betão para os efeitos de convecção e radiação

ϕ fator de configuração

Letras minúsculas gregas

α_c coeficiente de transferência de calor por convecção

γ_c coeficiente parcial de segurança do betão

γ_G coeficiente parcial relativo às ações permanentes, G

$\gamma_{M,fi}$ coeficiente parcial de segurança em situação de incêndio

γ_Q coeficiente parcial relativo às ações variáveis, Q

γ_s coeficiente parcial de segurança do aço

ε_c coeficiente de emissividade do betão

ε_{c0} extensão no betão no lado mais comprimido da secção transversal

$\varepsilon_{c1,\theta}$ extensão do betão para uma temperatura θ

$\varepsilon_{cth}(\theta)$ extensão térmica do betão para uma temperatura θ

$\varepsilon_{cu1,\theta}$ extensão limite última do betão para uma temperatura θ

$\varepsilon_s(\theta_s)$ extensão térmica do aço das armaduras para betão armado para uma temperatura θ

η_{fi} fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio

θ_c temperatura no betão

θ_{cr} temperatura crítica das armaduras

θ_g temperatura dos gases no compartimento de incêndio

θ_M temperatura no centro de massa da secção transversal

θ_{sc} temperatura média de todas as armaduras na zona comprimida

λ_c condutividade térmica do betão

μ_{fi}	grau de utilização em situação de incêndio
$\rho(\theta_c)$	densidade do betão para uma temperatura θ
$\sigma_{s,fi}$	tensão do aço em situação de incêndio
φ	coeficiente de fluência do betão
$\psi_{2,j}$ ou ψ_{fi}	coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes
ω	relação mecânica de armadura à temperatura ambiente
ω_{mod}	grau de reforço mecânico modificado

Abreviaturas e acrônimos

C ₃ H ₈	Propano
CO ₂	Dióxido de carbono
EN	European norm
H ₂ O	Água
O ₂	Oxigénio
POO	Programação orientada a objetos
RJ-SCIE	Regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios
RT-SCIE	Regulamento técnico de segurança contra incêndio em edifícios
XD-Fire	Xpress Design of Concrete Sections Under Fire Loading

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação consistiu na criação e desenvolvimento de um programa, denominado XD-Fire (*Xpress Design of Concrete Sections Under Fire Loading*), que consiste na análise da resistência ao fogo em elementos estruturais de betão armado, segundo a EN 1992-1-2 de 2004. Este software possibilita o cálculo imediato de vários parâmetros associados ao cálculo da resistência do betão armado ao fogo, o que permite uma maior celeridade na obtenção dos resultados necessários para a correta construção de estruturas de betão com o máximo de resistência ao fogo possível, o que contribui para aumentar a probabilidade de salvar vidas em situação de incêndio.

1.1. Enquadramento

O fogo é uma das ações acidentais que mais danos causa em edifícios: “um incêndio é uma ocorrência de fogo não controlado” (Denoël, 2007). O fogo consiste na variação da temperatura dos elementos estruturais do edifício, causando alterações térmicas e mecânicas nos materiais, o que proporciona dilatações térmicas e alterações nas propriedades dos materiais fisicamente e quimicamente, o que provoca uma diminuição da resistência da estrutura levando ao seu colapso.

O colapso de uma estrutura poderá ser evitado (e os danos reduzidos) se for previamente verificada. Atualmente, existem inúmeros programas de engenharia civil que proporcionam, de forma rápida, segura e eficaz, verificar se um edifício exposto a diversas ações (permanentes, acidentais, variáveis, neve) consegue ou não manter a sua integridade – de forma a evitar o colapso e, conseqüentemente, salvar vidas.

Com a existência destes programas, o tempo necessário para a realização de trabalhos de engenharia foi reduzido, o que demorava dias a ser verificado, calculado e desenhado agora demora poucas horas ou até minutos, dependendo da complexidade do projeto. Assim, o desenvolvimento de programas informáticos de cálculo automático proporciona um grande contributo na engenharia civil em situações de projeto e, também, como apoio de exercícios académicos.

1.2. Objetivos

Pretende-se com o programa desenvolvido, XD-Fire, verificar a resistência ao fogo de um elemento estrutural.

O XD-Fire propõe dois métodos de cálculo: tabelado e simplificado. Estes métodos são baseados na EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020, que ainda não se encontra em utilização e traduzida em Portugal.

Pretende-se que a utilização deste software seja simples, rápida e intuitiva sem prejuízo da fiabilidade dos resultados por ela obtidos. O XD-Fire dispõe de uma interface gráfica que facilita a introdução dos dados, onde se encontram previamente introduzidas as propriedades dos materiais, proporcionando ao utilizador a sua personalização.

Ainda que este software se baseie no conceito de “qualquer pessoa pode usar o XD-Fire” é imperativo que os utilizadores possuam algum conhecimento básico de engenharia civil.

Em suma, pretendeu-se a elaboração de um programa de cálculo que cumpra os seguintes objetivos:

- verificar da resistência ao fogo de um elemento em betão armado;
- desenvolver uma interface gráfica de fácil interpretação e utilização;
- disponibilizar características e propriedades dos materiais, possibilitando a sua personalização;
- disponibilizar um resultado imediato e fiável.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2: *Enquadramento Teórico* – apresentam-se expostos conceitos referentes ao fogo e os elementos envolvidos na sua formação, passando pelo seu desenvolvimento e modelação, concluindo com as suas consequências, sistemas de combate e reabilitação em edifícios;
- Capítulo 3: *Legislação em Vigor em Portugal* – apresentação e descrição dos regimes jurídicos e técnicos portugueses, os eurocódigos adotado e utilizados atualmente em Portugal;

- Capítulo 4: *Metodologia de Cálculo Segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020* – descrição dos métodos de cálculo (tabelado e simplificado) utilizados na verificação de segurança ao fogo para elementos estruturais de betão armado segundo a EN 1992-1-2 de 2020;
- Capítulo 5: *Linguagem de Programação* – descrição de alguns fundamentos da linguagem de programação utilizada, C#.
- Capítulo 6: *Programa XD-Fire* – apresentação do programa desenvolvido, o XD-Fire. São descritas as suas funcionalidades, as secções e elementos constituintes da janela de introdução de dados e na janela de resultados para os dois métodos de cálculo utilizados (tabelado e simplificado);
- Capítulo 7: *Exemplos Práticos* – apresentação da resolução de alguns exemplos práticos com a utilização do programa XD-Fire;
- Capítulo 8: *Considerações Finais* – apresentação das conclusões e sugestão de trabalhos futuros referentes ao programa XD-Fire e à presente dissertação.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo abordar-se-ão alguns conceitos e fundamentos teóricos associados ao conceito de *fogo*, procurando perceber os seus elementos constitutivos e o seu processo de formação, passando pelo seu desenvolvimento e finalmente pelos sistemas passivos e ativos de combate ao fogo.

Para uma melhor abordagem deste capítulo, dever-se-á ter em conta os métodos de transmissão de calor, nomeadamente (Abu, 2017; Della-Giustina, 2014; Denoël, 2007; Guimarães, 2010; Reis, 2011):

- Condução – a transferência de calor é efetuada em materiais sólidos através do contacto direto, ou por aquecimento dos objetos que se encontram ao seu redor;
- Convecção – a transferência de calor é efetuada através do movimento de um líquido ou gás no meio em que encontra;
- Irradiação – a transferência de calor é efetuada por ondas eletromagnéticas para as superfícies circundantes (Abu, 2017; Della-Giustina, 2014; Denoël, 2007; Guimarães, 2010; Reis, 2011).

2.1. Definição do fogo e dos seus elementos

A definição do fogo, descrita por diversos autores de diversas formas, é coincidente nos seus aspetos fundamentais: o fogo é uma reação química (designada de combustão) que acontece na presença de três elementos: combustível, comburente e fonte de calor (Abu, 2017; Della-Giustina, 2014; Denoël, 2007).

Como representado pela equação(1) (1), esta reação origina dois produtos, nomeadamente, vapor de água e dióxido de carbono (Abu, 2017; Denoël, 2007).



A representação simplificada e mais usual desta reação é o denominado triângulo do fogo (Figura 1). Neste estão representados os diferentes elementos que se encontram presentes aquando da reação do fogo (Della-Giustina, 2014; Denoël, 2007).

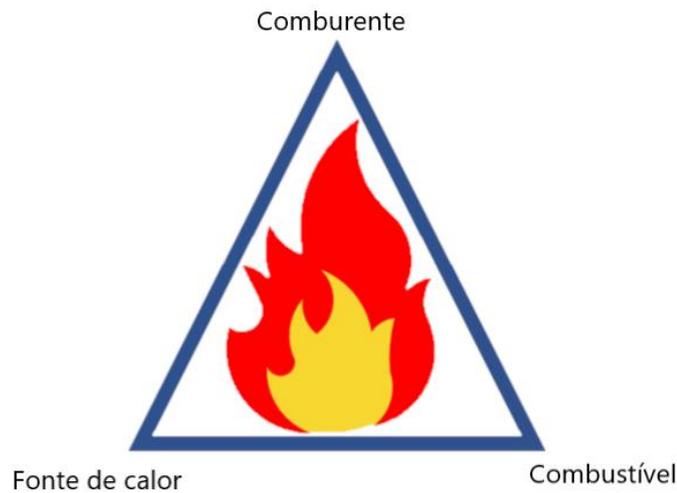


Figura 1. Triângulo do fogo.

O combustível é todo o material propício a entrar em combustão, este poderá ser apresentado em diversos estados físicos:

- Líquido – é convertido, com a ajuda de uma fonte de calor, para o estado gasoso. Alguns exemplos: Gasolina, álcool, óleo, entre outros com propriedades inflamáveis e combustíveis;
- Gasoso – o material combustível neste estado impulsiona o desenvolvimento e crescimento do fogo. Alguns exemplos: propano, metano, hidrogénio, entre outros;
- Sólido – podemos encontrar diversos tipos de materiais neste estado, como por exemplo, madeira, papel, tecido, borracha, entre outros (Della-Giustina, 2014).

A fonte de calor deverá fornecer energia suficiente para que se inicie a reação de combustão, esta poderá ser transferida por irradiação, convecção ou condução. Cigarros, faíscas ou chamas de equipamentos elétricos, descarga elétrica, entre outros, são alguns exemplos de fontes de calor (Della-Giustina, 2014).

O comburente tem como principal função associar quimicamente o combustível à reação de combustão, o que significa que este alimenta a queima do combustível na reação. Este deverá encontrar-se no estado gasoso. O principal comburente neste tipo de reação química é o oxigénio, visto constituir 21% da atmosfera terrestre e integrar a composição molecular de outros elementos (Della-Giustina, 2014).

2.2. Classes de fogos

Como o fogo pode ter diferentes origens, este poderá ser classificado em classes, dependendo do seu material combustível (Della-Giustina, 2014; IPQ, 1993, 2005):

- Classe A – fogos que resultam da combustão de materiais de natureza orgânica, sendo assim chamados de fogos sólidos ou fogos secos. Por exemplo: madeira, papel, borracha, carvão, tecidos, entre outros;
- Classe B – fogos que resultam da combustão de líquidos ou sólidos inflamáveis e combustíveis, designando-se assim de fogos de líquidos ou fogos gordos. Por exemplo: álcool, gasolina, vernizes, entre outros;
- Classe C – fogos que resultam da combustão de gases. Por exemplo: propano, metano, butano, entre outros. Estes são designados de fogos de gases;
- Classe D – fogos que resultam da combustão de metais. Por exemplo: titânio, zinco, alumínio, sódio, entre outros. Estes podem ser designados de fogos de metais ou fogos especiais;
- Classe F ou K – fogos que resultam da combustão de produtos usados na cozinha aquando fabrico de refeições. Por exemplo: gorduras e óleos de origem animal ou vegetal. Estes são designados de fogos de produtos para cozinhar (Della-Giustina, 2014; IPQ, 1993, 2005).

2.3. Desenvolvimento do fogo

Para que ocorra o desenvolvimento do fogo ao longo do tempo, dever-se-á ter em conta que este depende de três fatores presentes no espaço em que se encontra: quantidade de combustível; ventilação existente no espaço (pois quanto mais oxigênio maior o seu crescimento); e das características do espaço em que este se encontra (Kordina, 2010).

Este desenvolvimento pode ser representado graficamente por uma curva tempo-temperatura, designada de curva de incêndio natural (Figura 2). Esta poderá ser dividida em quatro secções que correspondem às quatro fases do desenvolvimento do fogo, respetivamente, ignição, propagação, desenvolvimento pleno e arrefecimento.

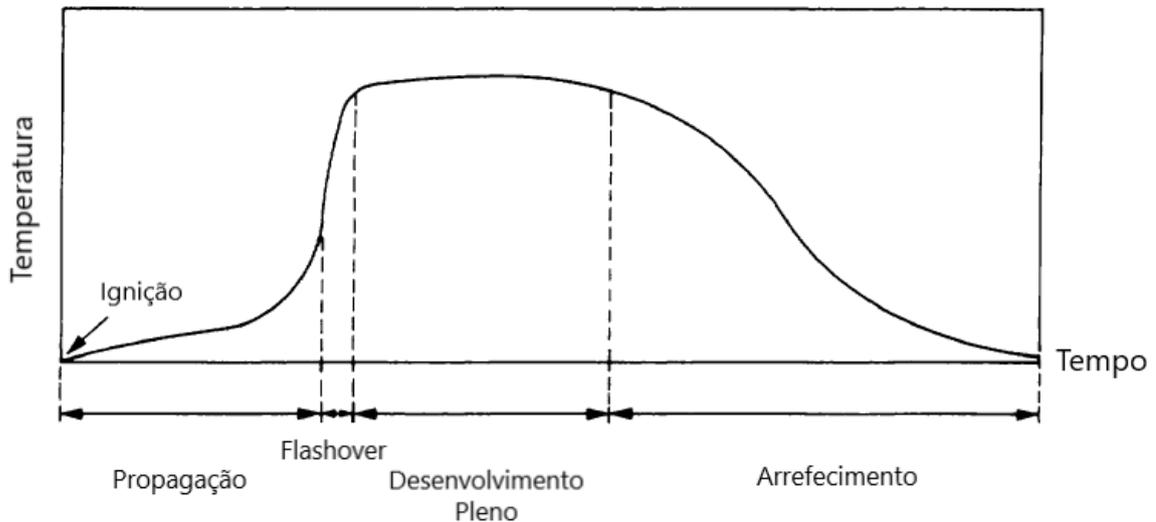


Figura 2. Curva de incêndio natural. Traduzido de Khoury et al., 2007.

Na primeira fase, designada de ignição, ocorre a reação de combustão em que o material combustível reage com a fonte de calor e o oxigénio, obtendo assim o fogo. Ocorrida a ignição, inicia-se a próxima fase designada de propagação.

Durante a fase de propagação, as temperaturas aumentam lentamente devido à libertação dos produtos resultantes da combustão. Chamas e calor são transferidos por radiação, condução e convecção proporcionando, assim, calor suficiente a outros materiais combustíveis de forma a estes iniciarem uma reação de combustão, ocorrendo um aumento súbito e exponencial da temperatura designado de *flashover*.

Após a ocorrência do *flashover* (entre os 450°C e os 600°C), o fogo entra na fase de desenvolvimento pleno. Nesta fase, o crescimento do fogo é limitado pelo material combustível ainda não consumido e da ventilação existente, o que resultará numa temperatura elevada mas constante.

Por fim, com a conseqüente diminuição do material combustível ou pela intervenção de agentes exteriores, a temperatura tenderá a baixar progressivamente até à extinção. Esta a última fase do desenvolvimento do fogo é designada por arrefecimento (Abu, 2017; 2014; Fernandes, 2008; Gonçalves, 2008; Guimarães, 2010; Kordina, 2010; Reis, 2011).

2.4. Modelação do fogo

Cada fogo é único e de características distintas, levando assim, a um desenvolvimento gráfico diferente do apresentado anteriormente pela curva de incêndio natural (Figura 2). Por este motivo, a modelação ao fogo consiste na aproximação gráfica de uma curva à curva de incêndio natural, sendo assim referidas dois tipos de curvas no eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010 e

apresentadas as suas expressões matemáticas no eurocódigo 1 parte 1-2 de 2010: curvas de incêndio nominais e curvas de incêndio paramétricas (Fernandes, 2008; Guimarães, 2010).

2.4.1. Curvas de incêndio nominais

As curvas de incêndio nominais são curvas representadas graficamente por uma relação tempo-temperatura (IPQ, 2010a). Estas não têm em consideração a temperatura do compartimento, mas apenas o tempo, em minutos, desde o início do fogo, considerando-se uma temperatura uniforme ao longo tempo pelo que, graficamente os períodos de ignição, arrefecimento e extinção do fogo não têm o mesmo tipo de representação que na curva de fogo padrão (Gonçalves, 2008; Guimarães, 2010; Khoury et al., 2007).

Estas encontram-se divididas em três tipo de curvas (IPQ, 2010a):

- Curva de incêndio padrão ou ISO 834:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

- Curva de incêndio para elementos exteriores:

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

- Curva de incêndio de hidrocarbonetos:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (4)$$

Sendo t o tempo em minutos e θ_g a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em °C.

Deverá ser considerado na utilização destas equações, (2), (3) e (4), um coeficiente de transferência de calor por convecção, α_c , igual a 25 W/m²K (IPQ, 2010a).

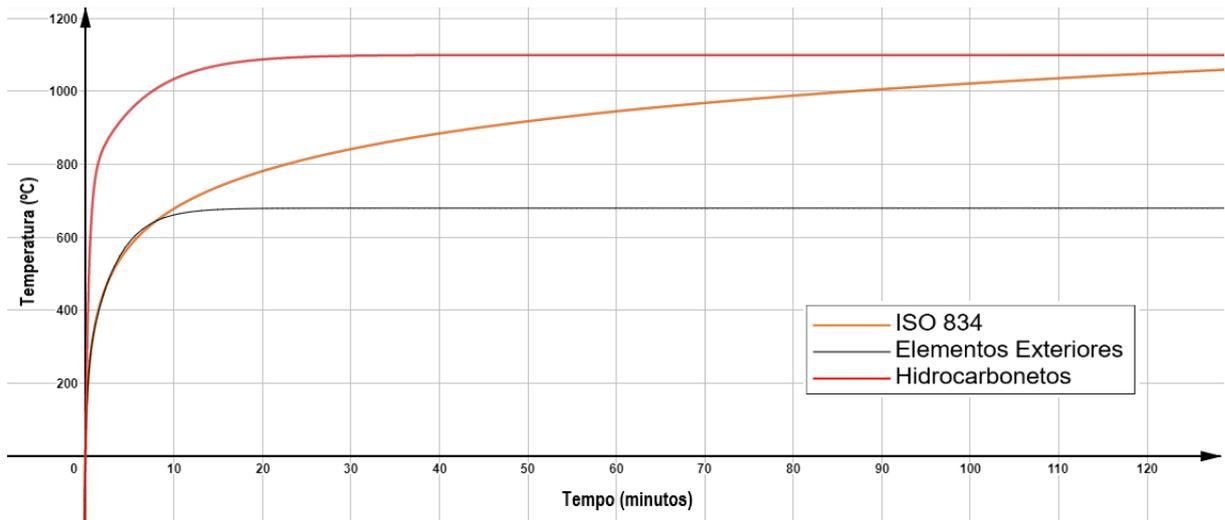


Figura 3. Curvas de incêndio nominais.

A curva de incêndio padrão ou ISO 834 é a mais utilizada na análise da resistência ao fogo de elementos estruturais em edifícios, cujo o fogo tenha como base materiais combustíveis de natureza orgânica (Khoury et al., 2007).

A curva de incêndio para elementos exteriores é utilizada para a análise da resistência ao fogo dos elementos estruturais exteriores em edifícios que foram expostos ao fogo indiretamente, a partir do interior do edifício por aberturas nas fachadas, como por exemplo, portas com acesso para o exterior, janelas, entre outros (Fernandes, 2008; Gonçalves, 2008; Guimarães, 2010; Reis, 2011). Esta poderá ser considerada a menos severa das três curvas apresentada.

A curva de incêndio de hidrocarbonetos foi primeiramente criada em 1970 pela Mobil, uma empresa petrolífera dos Estados Unidos da América. Esta é usada para incêndios nas indústrias *offshore* e petroquímicas. Devido ao facto de os hidrocarbonetos serem altamente inflamáveis, nos primeiros cinco minutos de incêndio verifica-se um aumento rápido da temperatura, sendo assim esta considerada a mais severa das três curvas apresentadas (Fernandes, 2008; Gonçalves, 2008; Khoury et al., 2007).

2.4.2. Curvas de incêndio paramétricas

As curvas de incêndio paramétricas são curvas representadas graficamente por uma relação tempo-temperatura mais aproximada de um incêndio real do que as curvas de incêndio nominais, pois as curvas paramétricas têm em consideração fatores do compartimento em que ocorre o incêndio, nomeadamente a densidade de carga do incêndio, condições de ventilação e

as características térmicas dos materiais que constituem a envolvente (Abu, 2017; Fernandes, 2008; Gonçalves, 2008; Guimarães, 2010; Khoury et al., 2007; Reis, 2011).

As respetivas equações destas curvas poderão ser encontradas em detalhe no anexo A do eurocódigo 1 parte 1-2 de 2010, bem como as respetivas limitações para o seu uso (IPQ, 2010a). Estas apresentam ainda curvas distintas para a fase de aquecimento e para a fase de arrefecimento, sendo estas diferenciadas das curvas de incêndio nominais que não apresentam fase de arrefecimento (Figura 4).

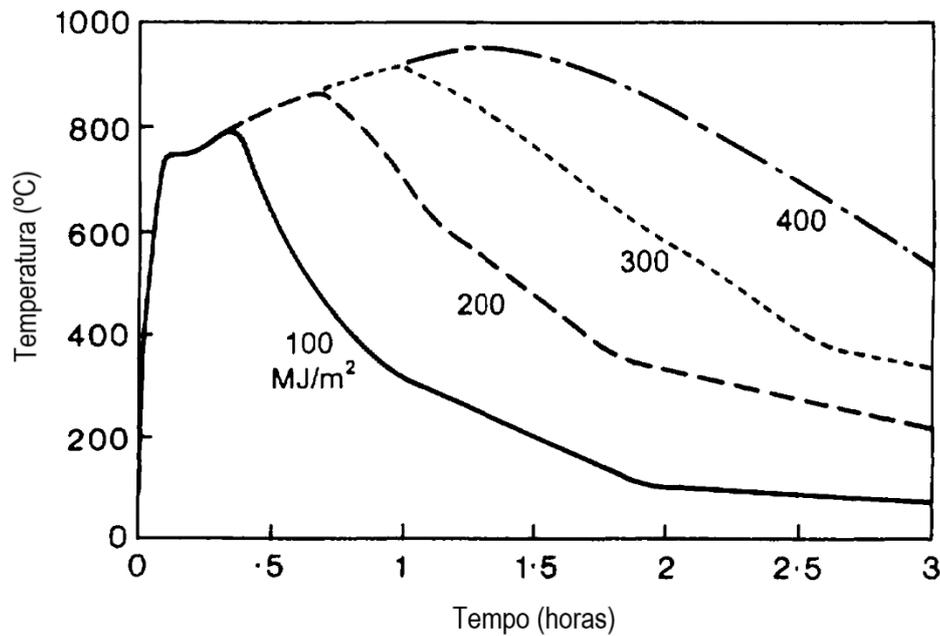


Figura 4. Exemplo de curvas paramétricas. Traduzido de Khoury et al. (2007).

2.5. Consequências do fogo

O fogo é uma das ações acidentais com maior probabilidade de acontecer e que causa mais estragos em edifícios. Devido à exposição prolongada dos elementos estruturais de um edifício a temperaturas elevadas, estes serão severamente afetados. Elementos estruturais em betão armado sofrerão, primeiramente, um decaimento no módulo de elasticidade e na tensão de rutura no aço. A capacidade de carga do elemento é, também, afetada, devido à redução da rigidez e da força de compressão. Isto resulta na deformação e fendilhação do elemento estrutural e ao consequente colapso do mesmo, o que conduz ao eventual desmoronamento de todo o edifício (Kordina, 2010).

O dano num edifício e nos seus elementos estruturais exposto ao fogo depende das propriedades térmicas do betão e do aço; do tempo a que este se encontra exposto ao fogo, quanto maior a duração mais danos causará ao elemento estrutural; da forma e dimensão da

secção; da fase do desenvolvimento do fogo em que se encontra, sendo a fase de desenvolvimento pleno a que mais danifica o elemento estrutural; e da evolução do fogo ao longo do tempo, quanto maior a evolução do fogo, mais rápido serão atingidas temperaturas elevadas (Denoël, 2007; Taerwe et al., 2008).

Em qualquer elemento estrutural de betão armado, as armaduras são as mais afetadas pelo fogo, pois o aço apresenta uma condutividade térmica superior à do betão fazendo com que estas sejam um dos fatores limitantes da estabilidade de uma estrutura perante o fogo (Phan, McAllister, Gross, & Hurley, 2010; Taerwe et al., 2008).

2.6.Sistemas de combate ao fogo

Ao longo do tempo foram surgindo diversos métodos e sistemas de combate ao fogo. Estes deveram ser considerandos aquando da fase de projeto e deve ser verificada a viabilidade de os introduzir durante ou após a construção do edifício. Existindo assim dois tipos de sistemas de combate ao fogo: passivos e ativos (Kordina, 2010; Phan et al., 2010). Ambos os sistemas têm como principais objetivos minimizar os danos causados ao edifício e reduzir o número de pessoas feridas e mortas numa situação de incêndio.

2.6.1. Sistemas passivos

Os sistemas de combate ao fogo passivos são introduzidos, normalmente, aquando da construção do edifício, pelo que devem ser considerados ainda na sua fase de projeto.

Os sistemas passivos são importantes e fundamentais para a proteção ao fogo, pois têm em consideração a resistência ao fogo dos elementos estruturais estando, assim, sempre operacionais e não requerem qualquer tipo de intervenção humana. Estes podem ser dimensionados para tempos de 30 minutos, 60 minutos, 90 minutos, 120 minutos, 180 minutos ou 240 minutos, o que permite a evacuação de pessoas e eventual intervenção humana no combate ao fogo, nomeadamente os bombeiros, evitando o colapso prematuro do edifício. Estes sistemas não invalidam o uso dos sistemas ativos presentes no edifício. (Abu, 2017; Denoël, 2007; Phan et al., 2010).

2.6.2. Sistemas ativos

Os sistemas ativos de combate ao fogo costumam ser introduzidos no edifício após a sua conclusão, podendo ser instalados durante a fase de construção dependendo da tipologia do edifício. Estes necessitam de intervenção humana ou de estímulo por parte do fogo para que possam ser ativados (Abu, 2017; Kordina, 2010). Os sistemas que requerem estímulo por parte do fogo estão preparados para o detetar e, conseqüentemente, ativar-se automaticamente, alertando da presença de fogo no edificio (Denoël, 2007).

Alguns exemplos de sistemas ativos são os extintores, os alarmes de incêndio, os detetores de fumo, e os aspersores, entre outros (Della-Giustina, 2014; Denoël, 2007).

2.7.Reabilitação de edifícios danificados

A decisão de efetuar a reabilitação de um edifício danificado pelo fogo tem no fator económico o principal fator condicionante. Estes edifícios têm que ser inspecionados por autoridades especializadas que deveram verificar se este se encontra em condições para uma possível reabilitação ou não. Devem ser recolhidas amostras do betão e do aço das armaduras e ser feita a verificação do grau de severidade do fogo a que o edifício esteve exposto (Kordina, 2010). A severidade do fogo pode ser verificada através de alguns elementos visuais, tais como, a carbonização da madeira, a quantidade de material e elementos estruturais não queimados e danificados, a medição das fissuras existentes nos elementos estruturais, o estado das armaduras (se estas estiveram em contacto com o fogo ou se apresentam deformação), entre outros (Kordina, 2010).

Caso seja possível a reabilitação do edifício, este deverá seguir as regras de segurança estruturais em vigor (Kordina, 2010).

3. LEGISLAÇÃO EM VIGOR EM PORTUGAL

Atualmente em Portugal, encontra-se em vigor legislação portuguesa referente à segurança contra incêndios em edifícios – o Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RJ-SCIE), e o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE), bem como legislação europeia, nomeadamente, o Eurocódigo 1 parte 1-2 (referente às ações em estruturas expostas ao fogo) e o Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010 (referente à verificação da resistência ao fogo em estruturas de betão).

3.1. Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios

O decreto-lei n.º 220/2008 implementado a 12 de novembro de 2008, estabeleceu o Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RJ-SCIE). Este tem como princípios a preservação da vida humana, ambiental e do património cultural, visando (**Art.º4, N.º 2, alíneas a a d**) (Decreto-lei n.º 220/2008, 2008, p.7905):

- a) Reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios;
 - b) Limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão;
 - c) Facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco;
 - d) Permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro
- (Decreto-lei n.º 220/2008, 2008, p. 7905).

Segundo o disposto pela Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil, este Decreto-lei já sofreu um total de 4 alterações ao longo dos anos:

- Primeira alteração: Decreto-lei n.º 224/2015 de 9 de outubro de 2015 do Ministério da Administração Interna;
- Segunda alteração: Decreto-lei n.º 95/2019 de 18 de julho de 2019 da Presidência do Conselho de Ministros Presente na 1.ª série do Diário da República;
- Terceira alteração: Lei n.º 123/2019 de 18 de outubro de 2019 da Assembleia da República na 1.ª série do Diário da República;
- Quarta alteração: Decreto-lei n.º 9/2021 de 29 de janeiro de 2021 da Presidência do Conselho de Ministros na 1.ª série do Diário da República.

Sendo a quarta alteração a aprovação de um regime de contraordenações, será utilizada a Lei n.º 123/2019 onde foram efetuadas alterações mais relevantes e diretas ao Decreto-Lei n.º 220/2008.

Esta lei classifica os edifícios e recintos nas suas utilizações-tipo bem como nos locais de risco de incêndio. Esta apresenta ainda categorias de risco e os fatores de risco referentes às utilizações-tipo.

Os edifícios e recintos são classificados por este decreto-lei em 12 utilizações-tipo, nomeadamente (Art.º8) (Lei n.º 123/2019, 2019, p.18):

- Tipo I – habitacionais;
- Tipo II – estacionamento;
- Tipo III – administrativos;
- Tipo IV – escolares;
- Tipo V – hospitalares e lares de idosos;
- Tipo VI – espetáculos e reuniões públicas;
- Tipo VII – hoteleiros e restauração;
- Tipo VIII – comerciais e gares de transporte;
- Tipo IX – desportivos e de lazer;
- Tipo X – museus e galerias de arte;
- Tipo XI – bibliotecas e arquivos;
- Tipo XII – industriais, oficinas e armazéns.

Os locais de um edifício ou recinto, podem ser classificados em função do seu risco de incêndio através de uma classificação de A a F, em que A representa o local com menor grau de risco de incêndio e F representa o local com maior grau de risco de incêndio (**Art.º10**) (Lei n.º 123/2019, 2019, p.21).

Cada utilização-tipo e os seus respetivos fatores de risco são classificados consoante a sua categoria de risco como de 1ª, 2ª, 3ª e 4ª categoria, o que corresponde, respetivamente, a risco reduzido, risco moderado, risco elevado e risco muito elevado (**Art.º12**) (Lei n.º 123/2019, 2019, pp. 23-24)

Os fatores de risco considerados para as utilizações-tipo descritas no artigo 12 desta Lei são:

- Altura da utilização-tipo;
- Número de pisos abaixo do plano de referência;
- Espaço coberto ou ao ar livre;
- Área bruta;
- Efetivo (número máximo de pessoas presentes em simultâneo num espaço);
- Efetivo em locais de tipo D ou E;
- Saída independente de locais de tipo D (direta ao exterior, ao nível do plano de referência);
- densidade de carga de incêndio modificada.

No artigo n.º 9 desta lei encontram-se referidos os produtos de construção. Todos os produtos de construção deverão possuir relatórios de classificação emitidos pelo Instituto Português da Qualidade, I.P. ou por outro Estado-Membro, sendo também permitido a verificação da resistência ao fogo por métodos de cálculo ou tabelas dispostas nos códigos europeus ou fornecidas pelas entidades anteriormente referidas. São considerados como produtos de construção todos os produtos destinados a serem incorporados num edifício, tais como:

- materiais de construção;
- elementos de construção;
- componentes isolados ou módulos de sistemas pré-fabricados ou instalações.

No anexo II desta lei encontram-se dispostas tabelas que definem as classes de desempenho da resistência ao fogo padrão referentes aos produtos de construção de acordo com as normas europeias. Nestas encontram-se as seguintes classificações para (Lei n.º 123/2019, 2019):

- elementos com função de suporte de carga e sem função de compartimentação resistente ao fogo: paredes, pavimentos, cobertura, vigas, pilares, varandas, escadas e passagens;
- elementos com função de suporte de carga com função de compartimentação resistente ao fogo:
 - paredes;
 - pavimentos e coberturas;

- produtos e sistemas de proteção de elementos ou partes de obras com funções de suporte de carga:
 - tetos sem resistência independente ao fogo;
 - revestimentos, revestimentos exteriores, painéis e placas de proteção contra o fogo.
- elementos ou parte de obras sem funções de suporte de carga e produtos a eles destinados:
 - divisórias (incluindo divisórias com porções não isoladas);
 - tetos com resistência independente ao fogo;
 - fachadas e paredes exteriores (incluindo elementos envidraçados);
 - pisos falsos;
 - vedações de coberturas de passagem de cados e tubagens;
 - portas e portadas corta-fogo e respetivos dispositivos de fecho (incluindo as que comportem envidraçados e ferragens);
 - portas de controlo do fumo;
 - obturadores para sistemas de transporte continuo por correias e carris;
 - condutas e ductos;
 - revestimentos para paredes e coberturas.
- produtos destinados a sistemas de ventilação, excluindo exaustores de fumo e de calor:
 - condutas de ventilação;
 - registos corta-fogo.
- produtos incorporados em instalações:
 - cabos elétricos e de fibra ótica e acessórios; tubos e sistemas de proteção de cabos elétricos contra o fogo;
 - cabos ou sistemas de energia ou sinal com pequeno diâmetro (menos de 20mm e com condutores de menos de 2,50mm²).
- produtos destinados a sistemas de controlo de fumo:
 - condutas de controlo de fumos de compartimento único;
 - condutas de controlo de fumos resistentes ao fogo multicompartimentadas;
 - registos de controlo de fumo de compartimento único;
 - registos de controlo de fumo resistentes ao fogo multicompartimentadas;

- Barreiras antifumo;
- exaustores elétricos de fumo e de calor (ventiladores), juntas de ligação;
- exaustores naturais de fumo e de calor.

Deverão ser consideradas as denominações das características de resistência ao fogo apresentadas na Tabela 1 para durações de 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 e 360 minutos.

Tabela 1. Denominação das características de resistência ao fogo.

Abreviatura	Significado
R	Capacidade de suporte de carga
E	Estanquidade a chamas e gases quentes
I	Isolamento térmico
W	Radiação
M	Ação mecânica
C	Fecho automático
S	Passagem de fumo
P ou PH	Continuidade de fornecimento de energia e ou de sinal
G	Resistência ao fogo
K	Capacidade de proteção contra o fogo
D	Duração da estabilidade a temperatura constante
DH	Duração da estabilidade na curva tipo tempo-temperatura
F	Funcionalidade dos ventiladores elétricos
B	Funcionalidade dos ventiladores naturais de fumo e de calor

3.2.Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios

A portaria n.º 1532/2008, implementado a 29 de dezembro de 2008, estabeleceu o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RT-SCIE). Esta portaria sofreu uma alteração com a Portaria n.º 135/2020 de 2 de junho de 2020 e a sua posterior retificação n.º 26/2020 de 27 de julho de 2020.

Neste regulamento encontram-se dispostas disposições técnicas, para todos os edifícios e recintos dispostos no RJ-SCIE, para as condições (Art.º1, N.º 1, alíneas *a* a *f*) (Portaria n.º 135/2020, 2008, p.67):

- a) Exteriores comuns, gerais e específicas;
- b) De comportamento ao fogo, isolamento e proteção;
- c) De evacuação;
- d) Das instalações técnicas;
- e) Dos equipamentos e sistemas de segurança;

f) De autoproteção, igualmente aplicáveis aos edifícios e recintos já existentes à data de entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro (Portaria n.º 135/2020, 2020, p. 67).

Segundo este regulamento, a resistência ao fogo de elementos estruturais para as utilizações-tipo apresentadas na RJ-SCIE devem garantir as funções de isolamento térmico (*I*), estanquidade (*E*) e resistência mecânica (*R*), como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios.

Retirado de Portaria n.º 135/2020 (2020)

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função dos elementos estruturais
	1ª	2ª	3ª	4ª	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R 30	R 60	R 90	R 120	Apenas suporte
	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	Suporte e compartimentação
II, XI, XII	R 60	R 90	R 120	R 180	Apenas suporte
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte e compartimentação

3.3. Eurocódigo

Para além do regime jurídico e da regulamentação técnica de segurança contra incêndio em edifícios, também são utilizados em Portugal:

- Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. Parte 1-2: Ações gerais. Ações em estruturas expostas ao fogo;
- Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão. Parte 1-2: Regras gerais. Verificação da resistência ao fogo.

No Eurocódigo 1, parte 1-2, encontram-se descritas as ações térmicas e mecânicas para edifícios expostos ao fogo.

No Eurocódigo 2, parte 1-2 encontram-se expostas regras para o cálculo da resistência de estruturas de betão armado e pré-esforçado expostas ao fogo e são ainda definidas propriedades térmicas e mecânicas para o betão e aço a temperaturas elevadas.

3.3.1. Eurocódigo 1 parte 1-2

O Eurocódigo 1, parte 1-2, destina-se a estruturas expostas ao fogo, e permite o cálculo das ações térmicas e mecânicas dos materiais. Este possui diversos anexos:

- curvas paramétricas (anexo A);
- ações térmicas para elementos exteriores – método de cálculo simplificado (anexo B);
- incêndios localizados (anexo C);
- modelos de incêndio avançados (anexo D);
- densidade de carga de incêndio (anexo E);
- tempo equivalente de exposição ao fogo (anexo F);
- fator de vista (anexo G);
- anexo nacional.

Os anexos E e F só são usados parcialmente em Portugal, pelo que é necessária a consulta do anexo nacional presente neste eurocódigo antes da sua utilização.

O Eurocódigo 1, parte 1-2, encontram-se as equações para as curvas de incêndio nominais, bem como outros fatores necessários para o cálculo da resistência ao fogo através do eurocódigo 2 parte 1-2.

3.3.2. Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010 vs Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2020

O Eurocódigo 2 parte 1-2 permite efetuar a análise estrutural de três formas:

- *Por elementos* – permite a verificação da resistência ao fogo dos elementos estruturais isoladamente, desprezando as ações indiretas do fogo entre elementos estruturais;
- *Parte da estrutura* – são consideradas as ações indiretas do fogo entre elementos estruturais, contudo, deverão ser consideradas constantes ao longo do tempo;
- *Estrutura global* – permite a análise da totalidade da estrutura sendo consideradas todas as ações indiretas do fogo na estrutura, sendo esta análise considerada a mais complexa e menos usual.

O Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010 permite efetuar o cálculo da resistência ao fogo por três métodos:

- *Valores tabelados* – são disponibilizadas tabelas com valores para as dimensões mínimas da secção transversal de um elemento estrutural exposto ao fogo;
- *Cálculo simplificado* – encontra-se dividido em dois métodos: isotérmica de 500°C e zonas. Estes utilizam perfis de temperatura representados graficamente no anexo B.1 para determinar as temperaturas das secções transversais, de forma a proceder com o cálculo da resistência ao fogo da secção transversal segundo o procedimento de cada um dos métodos.
- *Cálculo avançado* – baseado no comportamento físico dos materiais.

O Eurocódigo 2, parte 1-2 de 2020 permite o cálculo da resistência ao fogo pelos métodos dos valores tabelados, cálculo simplificado e calculo avançado.

Ao contrário do Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2010, o Eurocódigo 2 parte 1-2 de 2020 utiliza:

- equações para determinar os perfis de temperatura ao invés de gráficos, permitindo uma obtenção da temperatura num dado ponto da secção transversal mais precisa do que através de estimativas aproximadas a olho;
- método de cálculo simplificado não se encontra dividido em dois métodos (isotérmica de 500°C e zonas), adotando por uma nova abordagem de cálculo da resistência ao fogo para cada elemento estrutural.

4. MÉTODOS DE CÁLCULO SEGUNDO A EN 1992-1-2 PARTE 1-2 DE 2020

Na EN 1992-1-2 de 2020, são apresentados dois métodos de cálculo, nomeadamente, o método de cálculo tabelado (que recorre ao uso de valores tabelados) e o método de cálculo simplificado (que utiliza diversas fórmulas matemáticas).

Esta EN considera apenas a exposição ao fogo padrão, tendo assim por base as curvas de incêndio nominais, pelo que os elementos estruturais deverão satisfazer os critérios *R*, *E* e *I*, que correspondem respetivamente, à resistência mecânica, estanquidade e isolamento.

As ações mecânicas e térmicas utilizadas para estes métodos de cálculo encontram-se presentes no Eurocódigo 1 parte 1-2 (IPQ, 2010a).

Os valores de cálculo das propriedades mecânicas dos materiais em situação de incêndio, $X_{d,\theta}$, deverão ser calculados através da equação (5):

$$X_{d,\theta} = \frac{k_{X,\theta} X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (5)$$

em que:

- X_k valor característico de uma propriedade de resistência ou de deformação à temperatura ambiente de acordo com o disposto no Eurocódigo 2 parte 1-1;
- $\gamma_{M,fi}$ coeficiente parcial de segurança em situação de incêndio para a propriedade mecânica em causa. Este deverá ser considerado igual a 1,0 no caso de este não ser definido no anexo nacional;
- $k_{X,\theta}$ fator de redução dependente da temperatura para uma propriedade de resistência ou de deformação. Este pode ser calculada através da equação (6):

$$k_{X,\theta} = \frac{X_{k,\theta}}{X_k} \quad (6)$$

Os valores de cálculo das propriedades térmicas dos materiais em situação de incêndio, deverá ser considerado igual aos seus valores característicos, que correspondem aos seus valores médios.

Uma estrutura ou elemento estrutural diz-se em segurança se o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, for menor ou igual ao valor de cálculo da resistência em situação de incêndio, $R_{d,fi}$, como expresso na equação (7):

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (7)$$

O valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, pode ser calculado para valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) ou frequentes ($\psi_{1,1}$) das ações variáveis. O Eurocódigo 1, parte 1-2 e o seu anexo nacional, recomenda a utilização dos valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) da ação variável, resultando assim na seguinte equação (8):

$$E_{d,fi} = \sum_{i \geq 1} G_{k,j} + A_d + \psi_{2,1} \times Q_{k,1} + \sum_{j \geq 2} \psi_{2,j} \times Q_{k,j} \quad (8)$$

em que:

- $G_{k,i}$ valor característico das ações permanentes;
- $Q_{k,1}$ valor característico da ação variável principal;
- $Q_{k,j}$ valor característico das restantes ações variáveis;
- A_d ação acidental, que neste caso corresponde ao valor de cálculo das ações térmicas indiretas devido ao fogo;
- $\psi_{2,1}$ coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes;
- $\psi_{2,j}$ coeficiente de combinação.

Esta equação (8) poderá ainda ser simplificada, caso a verificação da resistência ao fogo seja feita através da análise por elementos (como a usada nesta dissertação), pois esta análise despreza as ações indiretas do fogo entre elementos estruturais, possibilitando assim desprezar a ação acidental do fogo ($A_d = 0$), originando assim a seguinte equação (9):

$$E_{d,fi} = \sum_{i \geq 1} G_{k,j} + \psi_{2,1} \times Q_{k,1} + \sum_{j \geq 2} \psi_{2,j} \times Q_{k,j} \quad (9)$$

Segundo o Eurocódigo 1, parte 1-2, o cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, $E_{d,fi}$, poderá ser simplificado, considerando uma análise estrutural à temperatura ambiente (20°C), obtida pela equação (10):

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} \times E_d \quad (10)$$

em que:

- η_{fi} fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio;
- E_d valor de cálculo da força ou do momento à temperatura ambiente.

O fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio, η_{fi} , poderá ser considerado igual a 0,7, segundo a EN 1992-1-2 de 2020 ou calculado através da seguinte equação (11):

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (11)$$

em que:

- γ_G coeficiente parcial relativo da ação permanente;
- $\gamma_{Q,1}$ coeficiente parcial relativo da ação variável;
- ψ_{fi} coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes, $\psi_{2,1}$, ou frequentes, $\psi_{1,1}$.

4.1.Método de Cálculo Tabelado

O método de cálculo tabelado consiste num conjunto de tabelas onde são fornecidos valores mínimos referentes às dimensões do elemento estrutural e à distância da armadura à face exposta ao fogo, a , para uma resistência ao fogo mínima de 30 minutos e máxima de 240 minutos. Todos os valores apresentados nas tabelas encontram-se do lado da segurança, não sendo possível estipular valores para resistências ao fogo inferiores a 30 minutos ou maiores que 240 minutos.

Ao serem usados os valores mínimos apresentados nas tabelas do método de cálculo tabelado, não será necessário proceder a análises para o esforço transversal, torção e a fenómenos de *spalling*. No entanto, estas tabelas deverão ser aplicadas a elementos de betão (densidade entre 2000 kg/m³ e 2600 kg/m³) com agregados siliciosos e calcários. Para pilares em betão com agregados calcário, as dimensões mínimas apresentadas na tabela poderão ser reduzidas em 10%. Esta redução também se poderá aplicar para betão leve em vigas e lajes.

Na Figura 5 encontram-se esquematizadas as dimensões apresentadas nas tabelas, e que deverão ser respeitadas, sendo elas:

- b – largura ou menor dimensão da secção transversal;
- b_w – espessura da alma da secção transversal;
- h – altura da secção transversal;
- a e a_{sd} – distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo.

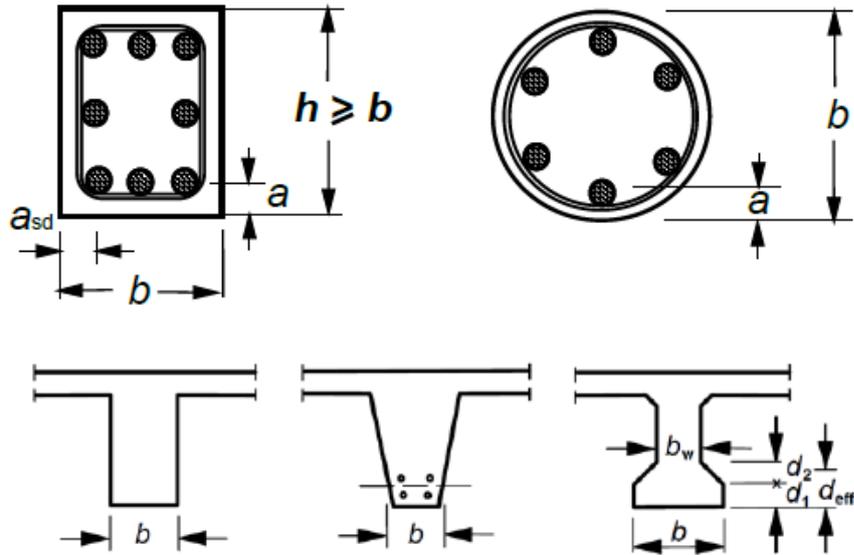


Figura 5. Dimensões da secção transversal usadas nas tabelas do método de cálculo tabelado. Retirado de CEN (2020).

Caso um elemento estrutural apresente varões com diferentes diâmetros, várias camadas de varões expostos ao fogo ou diferentes classes de aço (Figura 6), a distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a_m , deverá ser calculado segundo a seguinte equação (12):

$$a_m = \frac{\sum A_{si} \times f_{yki} \times a_i}{\sum A_{si} \times f_{yki}} \quad (12)$$

em que:

- A_{si} área da secção transversal do varão de aço “i”;
- f_{yki} tensão característica de cedência do aço à temperatura ambiente para o varão “i”;
- a_i distancia do eixo do varão “i” à face exposta ao fogo.

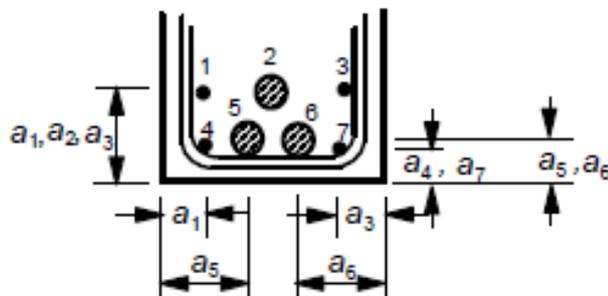


Figura 6. Dimensões para o cálculo de a_m . Retirado de IPQ (2010c).

Para elementos estruturais simplesmente apoiados e tracionados, sujeitos à flexão e com uma temperatura crítica diferente de 500°C, o valor da distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , retirado das tabelas (referentes a viga simplesmente apoiada, laje simplesmente apoiada e laje nervurada) deverá ser alterado segundo o seguinte procedimento:

- a) calcular a tensão no aço, $\sigma_{s,fi}$, para ações em situação de fogo ($E_{d,fi}$) segundo a seguinte equação (13):

$$\sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \times \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \times \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \Leftrightarrow \sigma_{s,fi} = \eta_{fi} \times \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (13)$$

em que:

- f_{yk} tensão característica de cedência do aço a uma temperatura de 20°C;
- γ_s coeficiente parcial de segurança do aço;
- $A_{s,req}$ área de aço requerido para o estado limite ultimo segundo a EN 1992-1-1;
- $A_{s,prov}$ área de aço utilizada;
- $E_{d,fi}/E_d$ considerado a equação (10) esta divisão será igual ao fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio, η_{fi} .

- b) calcular a temperatura crítica da armadura, θ_{cr} , tendo em conta o valor previamente obtido do fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio, η_{fi} , usando a equação (14):

$$\theta_{cr} = f_{se,\theta}(\theta_{cr}) \text{ para aço para betão armado} \quad (14)$$

em que:

- $f_{se,\theta}$ tensão equivalente do aço de reforço para valores de extensão superiores a $\varepsilon_{sp,\theta}$ e inferiores a $\varepsilon_{sy,\theta}$.

- c) ajustar o valor apresentado nas tabelas da distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , para a nova temperatura crítica da armadura, θ_{cr} , através da seguinte equação (15):

$$\Delta a = 0,1 \times (500 - \theta_{cr}) \quad (15)$$

em que:

Δa ajuste do valor tabelado da distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , em milímetros.

Só será possível efetuar o ajuste ao valor tabelado da distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo pela equação (15) se a temperatura crítica, θ_{cr} , for maior que 350°C e menor que 700°C. Caso esta temperatura não se encontre neste intervalo, deverão ser utilizados perfis de temperatura.

Para vigas e elementos tracionados em que a temperatura crítica da armadura, θ_{cr} , seja inferior a 400°C, a dimensão b_{min} apresentada nas tabelas deverá ser aumentada para b_{mod} segundo a seguinte equação (16):

$$b_{mod} \geq b_{min} + 0,8 \times (400 - \theta_{cr}) \quad (16)$$

em que:

b_{min} dimensão mínima da largura da secção transversal segundo os quadros da EN 1992-1-2 de 2020, correspondente à resistência ao fogo padrão requerida.

Na EN 1992-1-2, de 2020, é possível encontrar as tabelas, para o método de cálculo tabelado, para os seguintes elementos estruturais e as suas disposições:

- Pilar – método A (1 e 4 faces expostas ao fogo);
- Pilar – método B;
- Parede de compartimentação não resistente;
- Parede resistente maciça;
- Elementos tracionados;
- Viga simplesmente apoiada (até 3 faces expostas ao fogo);
- Viga contínua (até 3 faces expostas ao fogo);
- Viga todas as faces expostas ao fogo;
- Laje maciça simplesmente apoiada;
- Laje maciça contínua;
- Laje fungiforme;
- Laje nervurada.

4.1.1. Pilar

A verificação da resistência ao fogo de um pilar pode ser feita por dois métodos: método A e método B. O método A deverá ser, somente, utilizado para pilares contraventados; o método B pode ser usado para pilares contraventados e não contraventados ou de contraventamento.

Para a verificação da resistência ao fogo de pilares, deverá ser usado o grau de utilização em situação de incêndio, μ_{fi} , em vez do fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio, η_{fi} . O grau de utilização em situação de incêndio “toma em conta as combinações de ações, a resistência à compressão e à flexão do pilar, incluindo os efeitos de segunda ordem” (IPQ, 2010c), ao contrário do fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio que considera, no seu cálculo, que o pilar se encontra totalmente carregado à temperatura ambiente. O grau de utilização em situação de incêndio poderá ser cálculo através da seguinte equação (17):

$$\mu_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd}} \quad (17)$$

em que:

- $N_{Ed,fi}$ valor de cálculo do esforço axial normal em situação de incêndio;
- N_{Rd} valor de cálculo da resistência do pilar à temperatura ambiente, este deverá ser calculado de acordo com a EN 1992-1-1, usando os valores de γ_M para a temperatura ambiente, incluindo os efeitos de segunda ordem e uma excentricidade inicial igual à de $N_{Ed,fi}$.

O comprimento efetivo de um pilar em situação de incêndio, $l_{o,fi}$, pode ser considerado, de um modo geral, igual ao seu comprimento efetivo à temperatura ambiente, l_o . Em estruturas contraventadas, o comprimento efetivo do pilar em situação de incêndio, $l_{o,fi}$, poderá ser determinado tendo em conta a sua posição no edifício (Figura 7), nomeadamente, se este é um pilar de piso intermédio ou se é um pilar de piso superior, através das seguintes equações (18) e (19):

$$l_{o,fi} = 0,5l, \text{ para pilar de piso intermédio} \quad (18)$$

$$l_{o,fi} = 0,7l, \text{ para pilar de piso superior} \quad (19)$$

em que:

l comprimento do pilar.

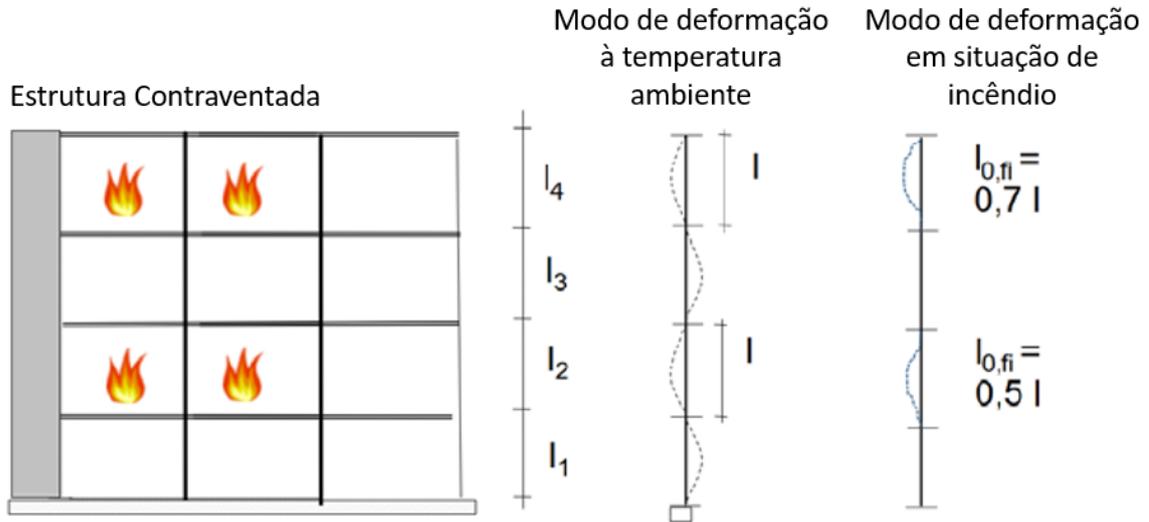


Figura 7. Comprimento efetivo de um pilar em situação de incêndio, $l_{0,fi}$, para estruturas contraventadas. Retirado de CEN (2020)

4.1.1.1. Método A

O método A, segundo a EN 1992-1-2, apresenta-se dividido em: pilar exposto a uma face e pilar exposto a quatro faces. Este método deverá ser aplicado a estruturas contraventadas em que os pilares estejam sujeitos à compressão.

Pilar com quatro faces expostas ao fogo

Para a verificação da resistência ao fogo de um pilar com quatro faces expostas ao fogo, deverão ser respeitadas as seguintes condições:

- a) O comprimento efetivo do pilar à temperatura ambiente, l_0 , deverá ser igual ou menor que 6 metros e o comprimento efetivo do pilar em situação de incêndio para:

- secção transversal retangular:

$$l_{0,fi} \leq 3m \text{ com } l_{0,fi}/l_0 = 0,5 \quad (20)$$

- secção transversal circular:

$$l_0 \leq 5m \text{ e } l_{0,fi} \leq 2,5m \text{ com } l_{0,fi}/l_0 = 0,5 \quad (21)$$

- b) A excentricidade de 1ª ordem em situação de incêndio:

$$e = \frac{M_{0Ed,fi}}{N_{Ed,fi}} < 25\% \quad \begin{array}{l} \text{da dimensão da seção na direção} \\ \text{da excentricidade} \end{array} \quad (22)$$

em que:

$M_{0,Ed,fi}$ valor de cálculo do momento de 1ª ordem em situação de incêndio.

c) Área total de armadura, A_s :

$$A_s < 0,04A_c \quad (23)$$

em que:

A_c área total de betão.

Verificadas estas condições, o próximo passo será calcular a distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , através da equação (12) e o grau de utilização em situação de incêndio, μ_{fi} , pela equação (17).

Com a resistência ao fogo (R) para a qual se pretende verificar a segurança do pilar exposto ao fogo, a largura do pilar (b), a distância ao eixo da armadura (a) e o grau de utilização em situação de incêndio (μ_{fi}), poder-se-á utilizar a Tabela 3 e interpolações matemáticas de forma a encontrar os valores mínimos para b_{min} e a_{min} , correspondentes ao grau de utilização previamente obtido.

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. O pilar encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

Tabela 3. Dimensões mínimas e distâncias dos eixos das armaduras mínimas para um pilar com seção transversal retangular ou circular com quatro faces expostas ao fogo para $l_{0,fi}/l_0=0,5$. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Largura do pilar b_{min} / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	b_{min}	200	b_{min}	200	b_{min}	200
	a_{min}	25	a_{min}	25	a_{min}	32
					b_{min}	300
					a_{min}	27
60	b_{min}	200	b_{min}	200	b_{min}	250
	a_{min}	25	a_{min}	36	a_{min}	46
			b_{min}	300	b_{min}	350
			a_{min}	31	a_{min}	40
90	b_{min}	200	b_{min}	300	b_{min}	350
	a_{min}	31	a_{min}	45	a_{min}	53
	b_{min}	300	b_{min}	400	b_{min}	450
	a_{min}	25	a_{min}	38	a_{min}	40**
120	b_{min}	250	b_{min}	350	b_{min}	350
	a_{min}	40	a_{min}	45**	a_{min}	57**
	b_{min}	350	b_{min}	450	b_{min}	450
	a_{min}	35	a_{min}	40**	a_{min}	51**
180	b_{min}	350	b_{min}	350	b_{min}	450
	a_{min}	45**	a_{min}	63**	a_{min}	70**
240	b_{min}	350	b_{min}	450	b_{min}	-
	a_{min}	61**	a_{min}	75**	a_{min}	-

**) Mínimo 8 varões

A EN 1992-1-2, de 2020, apresenta um modo de cálculo alternativo que não necessita de utilizar a Tabela 3. Deverão ser ainda consideradas as condições a), b) e c) apresentadas anteriormente. Este modo de cálculo deve ser apenas utilizado para estruturas contraventadas sujeitas à compressão e que respeitem os seguintes parâmetros:

- para secções transversais retangulares:

$$l_0 \leq 6m \quad (24)$$

$$l_{0,fi} \leq 3m \text{ para } l_{0,fi}/l_0 = 0,5 \quad (25)$$

- para secções transversais circulares:

$$l_0 \leq 5m \quad (26)$$

$$l_{0,fi} \leq 2,5m \text{ para } l_{0,fi}/l_0 = 0,5 \quad (27)$$

- valores correspondentes a $l_{0,fi}=2m$ poder-se-á assumir pilares com $l_{0,fi}<2m$.

O modo alternativo corresponde ao cálculo da resistência ao fogo do pilar, R , através da seguinte equação (28):

$$R = 120 \times \left((R_{\mu_{fi}} + R_a + R_l + R_b + R_n) / 120 \right)^{1,8} \leq 240 \text{ min} \quad (28)$$

onde:

$$R_{\mu_{fi}} = 83 \times \left[1,0 - \mu_{fi} \times \frac{(1 + \omega)}{(0,85 + \omega)} \right] \quad (29)$$

$$R_a = 1,60 \times (a - 30) \quad (30)$$

$$R_l = 9,60 \times (5 - l_{0,fi}) \quad (31)$$

$$R_b = 0,09 \times b' \quad (32)$$

$$\begin{cases} R_n = 0 \text{ para } n = 4 \text{ (para varões de canto)} \\ R_n = 12 \text{ para } n > 4 \end{cases} \quad (33)$$

em que:

$$25 \text{ mm} \leq a \leq 80 \text{ mm} \quad (34)$$

$$b' = \frac{2 \times A_c}{(b + h)} \text{ para secções transversais retangulares ou} \quad (35)$$

o diâmetro para secções transversais circulares

$$200 \text{ mm} \leq b' \leq 450 \text{ mm} \quad (36)$$

$$h \leq 1,5b \quad (37)$$

$$\omega = \frac{A_s \times f_{yd}}{A_c \times f_{cd}} \quad (38)$$

Pilar com uma face exposta ao fogo

Para a verificação da resistência ao fogo de um pilar com uma face exposta ao fogo, deverão ser respeitadas as seguintes condições:

- a) O comprimento efetivo do pilar à temperatura ambiente, l_0 , deverá ser menor ou igual a 6 metros e o comprimento efetivo do pilar em situação de incêndio, $l_{0,fi}$, deverá ser menor ou igual a 3 metros com $l_{0,fi}/l_0=0,5$.
- b) A excentricidade de 1ª ordem em situação de incêndio:

$$e = \frac{M_{0Ed,fi}}{N_{Ed,fi}} < 25\% \quad \begin{array}{l} \text{da dimensão da seção na direção} \\ \text{da excentricidade} \end{array} \quad (39)$$

- c) Área total de armadura, A_s :

$$A_s < 0,04A_c \quad (40)$$

Verificadas estas condições, o próximo passo será calcular a distância do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , através da equação (12) e o grau de utilização em situação de incêndio, μ_{fi} , pela equação (17).

Com a resistência ao fogo (R) para a qual se pretende verificar a segurança do pilar, a largura do pilar (b), a distância ao eixo da armadura (a) e o grau de utilização em situação de incêndio (μ_{fi}), poder-se-á utilizar a Tabela 4 e interpolações matemáticas de forma a encontrar os valores mínimos para b_{min} e a_{min} , correspondentes ao grau de utilização previamente obtido.

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. O pilar encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

Tabela 4. Dimensões mínimas e distâncias dos eixos das armaduras mínimas para um pilar com uma face expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Largura do pilar b_{min} / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	b_{min}	100	b_{min}	120	b_{min}	130
	a_{min}	10	a_{min}	15	a_{min}	25
60	b_{min}	110	b_{min}	130	b_{min}	140
	a_{min}	10	a_{min}	15	a_{min}	25
90	b_{min}	120	b_{min}	140	b_{min}	155
	a_{min}	20	a_{min}	25	a_{min}	25
120	b_{min}	150	b_{min}	160	b_{min}	175
	a_{min}	25	a_{min}	30	a_{min}	35
180	b_{min}	185	b_{min}	200	b_{min}	230
	a_{min}	45	a_{min}	50	a_{min}	55
240	b_{min}	230	b_{min}	240	b_{min}	290
	a_{min}	60	a_{min}	65	a_{min}	70

4.1.1.2. Método B

O método B, segundo a EN 1992-1-2, de 2020, permite a verificação da resistência ao fogo de um pilar que pertença a uma estrutura contraventada ou que pertença a uma estrutura não contraventada ou de contraventamento.

Para o processo da verificação da resistência ao fogo deverão ser utilizadas as tabelas pertencentes ao anexo C da EN 1992-1-2, de 2020, que se encontram no anexo desta dissertação, nomeadamente, Tabela C, Tabela D, Tabela E, Tabela F, Tabela G, Tabela H, Tabela I, 0, Tabela K, Tabela L, Tabela M e Tabela N.

Com a resistência ao fogo (R) para a qual se pretende verificar a segurança do pilar, a largura do pilar (b), a distância ao eixo da armadura (a), o grau de utilização em situação de incêndio (μ_{fi}) e o comprimento efetivo do pilar à temperatura ambiente, poder-se-á utilizar a tabela correspondente à resistência ao fogo em análise (Tabela C a Tabela N) e interpolações matemáticas de forma a encontrar os valores mínimos para b_{min} e a_{min} , correspondentes ao grau de utilização previamente obtido.

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. O pilar encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.2. Parede

4.1.2.1. Parede de compartimentação não resistente

Uma parede de compartimentação não resistente deve assegurar os critérios de isolamento (I) e de estanquidade (E).

De forma a evitar deformações excessivas e a rotura entre a parede e a laje, deverá ser garantido que a relação entre a altura livre da parede e a sua espessura não seja inferior a 40. Estas paredes devem possuir uma espessura mínima, $h_{w,min}$, de forma a assegurar a resistência ao fogo pretendida. Na Tabela 5 encontram-se apresentadas as espessuras mínimas para cada resistência ao fogo de uma parede de compartimento não resistente.

Tabela 5. Espessura mínima de uma parede de compartimentação não resistente. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, EI (min)	Espessura Mínima da Parede, $h_{w,min}$ (mm)
30	60
60	80
90	100
120	120
180	150
240	175

A segurança ao fogo de uma parede será verificada se a espessura da parede, h_w , for superior à espessura mínima tabelada, $h_{w,min}$, para a resistência ao fogo pretendida.

4.1.2.2. Parede resistente maciça

Para o uso das tabelas referentes a paredes resistentes maciças, segundo a EN 1992-1-2 de 2020, deverão ser cumpridas as seguintes condições:

- a estrutura deverá ser contraventada;
- o cálculo do grau de utilização em situação de incêndio, μ_{fi} , poderá ser calculado pela equação (17).
- a excentricidade de 1ª ordem em situação de incêndio:

$$e = \frac{M_{0Ed,fi}}{N_{Ed,fi}} < 25\% \quad \text{da dimensão paralela da seção transversal} \quad (41)$$

O comprimento efetivo em situação de incêndio de uma parede resistente maciça, $l_{0,fi}$, deverá ser determinado da mesma forma que o comprimento efetivo em situação de incêndio de um pilar, através das equações (18) e (19).

De forma a evitar deformações excessivas e a rotura entre a parede e a laje, deverá ser garantido que a relação entre a altura livre da parede e a sua espessura não seja inferior a 40.

As tabelas apresentadas na EN 1992-1-2 de 2020 deveram ser utilizadas da seguinte forma:

- Parede resistente maciça com um lado exposto ao fogo:
 - $l_0 \leq 4,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 2,25\text{m}$ com $l_{0,fi}/l_0=0,5$;
 - $l_0 \leq 2,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 1,25\text{m}$ com $l_{0,fi}/l_0=0,5$;
- Parede resistente maciça com todos os lados expostos ao fogo:
 - $l_0 \leq 4,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 2,25\text{m}$ com $l_{0,fi}/l_0=0,5$;
 - $l_0 \leq 2,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 1,25\text{m}$ com $l_{0,fi}/l_0=0,5$

Com a resistência ao fogo (*REI*) para a qual se pretende verificar a segurança da parede resistente maciça, a espessura da parede (h_w), a distância ao eixo da armadura (a) e o grau de utilização em situação de incêndio (μ_{fi}), poder-se-á utilizar as tabelas apresentadas abaixo (Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9) e interpolações matemáticas de forma a encontrar os valores mínimos para $h_{w,min}$ e a_{min} , correspondentes ao grau de utilização previamente obtido.

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. A parede encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

Tabela 6. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com um lado exposto ao fogo com $l_0 \leq 4,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 2,25\text{m}$. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, REI (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Espessura da parede $h_{w,min}$ / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	$h_{w,min}$	100	$h_{w,min}$	110	$h_{w,min}$	120
	a_{min}	10	a_{min}	10	a_{min}	10
60	$h_{w,min}$	110	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	130
	a_{min}	10	a_{min}	15	a_{min}	20
90	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	135	$h_{w,min}$	140
	a_{min}	20	a_{min}	25	a_{min}	30
120	$h_{w,min}$	135	$h_{w,min}$	150	$h_{w,min}$	160
	a_{min}	25	a_{min}	30	a_{min}	35
180	$h_{w,min}$	155	$h_{w,min}$	170	$h_{w,min}$	180
	a_{min}	35	a_{min}	40	a_{min}	45
240	$h_{w,min}$	180	$h_{w,min}$	200	$h_{w,min}$	210
	a_{min}	40	a_{min}	45	a_{min}	50

Tabela 7. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com um lado exposto ao fogo com $l_0 \leq 2,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 1,25\text{m}$. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, REI (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Espessura da parede $h_{w,min}$ / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	$h_{w,min}$	80	$h_{w,min}$	90	$h_{w,min}$	100
	a_{min}	10	a_{min}	10	a_{min}	10
60	$h_{w,min}$	90	$h_{w,min}$	100	$h_{w,min}$	110
	a_{min}	10	a_{min}	10	a_{min}	15
90	$h_{w,min}$	100	$h_{w,min}$	110	$h_{w,min}$	120
	a_{min}	10	a_{min}	15	a_{min}	20
120	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	130
	a_{min}	15	a_{min}	20	a_{min}	25
180	$h_{w,min}$	150	$h_{w,min}$	150	$h_{w,min}$	150
	a_{min}	20	a_{min}	25	a_{min}	30
240	$h_{w,min}$	170	$h_{w,min}$	175	$h_{w,min}$	175
	a_{min}	25	a_{min}	30	a_{min}	35

Tabela 8. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com todos os lados expostos ao fogo com $l_0 \leq 4,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 2,25\text{m}$. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Espessura da parede $h_{w,min}$ / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	$h_{w,min}$	100	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	130
	a_{min}	10	a_{min}	10	a_{min}	10
60	$h_{w,min}$	120	$h_{w,min}$	155	$h_{w,min}$	170
	a_{min}	15	a_{min}	20	a_{min}	25
90	$h_{w,min}$	140	$h_{w,min}$	185	$h_{w,min}$	210
	a_{min}	20	a_{min}	30	a_{min}	35
120	$h_{w,min}$	165	$h_{w,min}$	210	$h_{w,min}$	240
	a_{min}	30	a_{min}	40	a_{min}	45
180	$h_{w,min}$	200	$h_{w,min}$	350	$h_{w,min}$	280
	a_{min}	45	a_{min}	50	a_{min}	55
240	$h_{w,min}$	250	$h_{w,min}$	305	$h_{w,min}$	340
	a_{min}	50	a_{min}	55	a_{min}	60

Tabela 9. Dimensões e distâncias ao eixo mínimas para uma parede resistente maciça com todos os lados expostos ao fogo com $l_0 \leq 2,5\text{m}$ e $l_{0,fi} \leq 1,25\text{m}$. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao Fogo, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)					
	Espessura da parede $h_{w,min}$ / distância ao paramento do eixo dos varões principais a_{min}					
	$\mu_{fi} = 0,2$		$\mu_{fi} = 0,5$		$\mu_{fi} = 0,7$	
30	$h_{w,min}$	90	$h_{w,min}$	100	$h_{w,min}$	110
	a_{min}	10	a_{min}	10	a_{min}	10
60	$h_{w,min}$	110	$h_{w,min}$	125	$h_{w,min}$	140
	a_{min}	10	a_{min}	15	a_{min}	20
90	$h_{w,min}$	125	$h_{w,min}$	155	$h_{w,min}$	170
	a_{min}	15	a_{min}	25	a_{min}	30
120	$h_{w,min}$	140	$h_{w,min}$	175	$h_{w,min}$	200
	a_{min}	25	a_{min}	35	a_{min}	40
180	$h_{w,min}$	175	$h_{w,min}$	215	$h_{w,min}$	240
	a_{min}	30	a_{min}	40	a_{min}	45
240	$h_{w,min}$	200	$h_{w,min}$	250	$h_{w,min}$	280
	a_{min}	35	a_{min}	45	a_{min}	50

4.1.3. Elementos Tracionados

Para a verificação da resistência ao fogo de um elemento tracionado deverá ser utilizada a Tabela 10 e as seguintes condições têm que ser cumpridas:

- no caso de uma extensão excessiva afetar a capacidade resistente da estrutura, a temperatura do elemento tracionado deverá ser reduzida para 400°C usando a Tabela 10;
- no caso da extensão reduzida deverão ser utilizadas as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais;
- a área da secção transversal do elemento tracionado deverá ser igual ou superior a $2b_{min}^2$.

Para a verificação de segurança ao fogo de uma extensão excessiva para a resistência ao fogo considerada de um elemento tracionado, deverá ser utilizada a Tabela 10 e interpolações matemáticas para determinar a distância ao eixo das armaduras mínimas (a_{min}), a largura mínima (b_{min}), a espessura mínima da alma (b_w) (no caso de secções em “I” ou em “T” com espessura da alma variável).

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. No caso de a temperatura crítica seja inferior a 400°C deverá ser determinado um b_{mod} através da equação (16). O elemento tracionado encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

Tabela 10. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo padrão, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)								Espessura da alma $b_{w,min}$
	Combinações possíveis de a e b_{min} em que a é a distância média ao eixo e b_{min} é a largura da viga								
30	b_{min}	80	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	200	80
	a_{min}	25	a_{min}	20	a_{min}	15*	a_{min}	15*	
60	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	200	b_{min}	300	100
	a_{min}	40	a_{min}	35	a_{min}	30	a_{min}	25	
90	b_{min}	150	b_{min}	200	b_{min}	300	b_{min}	400	110
	a_{min}	55	a_{min}	45	a_{min}	40	a_{min}	35	
120	b_{min}	200	b_{min}	240	b_{min}	300	b_{min}	500	120
	a_{min}	65	a_{min}	60	a_{min}	55	a_{min}	50	
180	b_{min}	240	b_{min}	300	b_{min}	400	b_{min}	600	140
	a_{min}	80	a_{min}	70	a_{min}	65	a_{min}	60	
240	b_{min}	280	b_{min}	350	b_{min}	500	b_{min}	700	160
	a_{min}	90	a_{min}	80	a_{min}	75	a_{min}	70	

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

4.1.3.1. Propriedades térmicas: betão

Coeficiente de emissividade, ε_c :

$$\varepsilon_c = 0,7 \quad (42)$$

Condutividade térmica, λ_c :

- Betão (normal):

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2, \text{ se } \theta_c \leq 140^\circ\text{C} \quad (43)$$

$$\lambda_c = -0,02604\theta_c + 5,324, \text{ se } 140^\circ\text{C} < \theta_c < 160^\circ\text{C} \quad (44)$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta_c}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta_c}{100} \right)^2, \text{ se } 160^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (45)$$

- Betão com agregados leves:

$$\lambda_c = 1 - (\theta_c/1600), \text{ se } \theta_c \leq 800^\circ\text{C} \quad (46)$$

$$\lambda_c = 0,5, \text{ se } \theta_c > 800^\circ\text{C} \quad (47)$$

Calor específico, c_p :

- teor de humidade, $u=0\%$ (betão seco e betão com agregados leves secos):

$$c_p(\theta_c) = 900, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \quad (48)$$

$$c_p(\theta_c) = 900 + (\theta_c - 100), \text{ se } 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (49)$$

$$c_p(\theta_c) = 1000 + (\theta_c - 200)/2, \text{ se } 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (50)$$

$$c_p(\theta_c) = 1100, \text{ se } 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (51)$$

- teor de humidade, u , não especificado:

- $100^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 115^\circ\text{C}$

$$c_{p,peak} = 900, \text{ para um } u = 0\% \quad (52)$$

$$c_{p,peak} = 1470, \text{ para } u = 1,5\% \quad (53)$$

$$c_{p,peak} = 2020, \text{ para } u = 3,0\% \quad (54)$$

- $115^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 200^\circ\text{C}$

$$\text{Valores entre } c_{p,peak} \text{ e } 1000 \quad (55)$$

- $\theta_c > 200^\circ\text{C}$

$$c_p(\theta_c) = 1000 + \left(\frac{\theta_c - 200}{2}\right), \text{ se } 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (56)$$

$$c_p(\theta_c) = 1100, \text{ se } 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (57)$$

Densidade, $\rho(\theta_c)$:

- Betão (normal):

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^\circ\text{C}), \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 115^\circ\text{C} \quad (58)$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(1 - 0,02 \left(\frac{\theta_c - 115}{85} \right) \right), \text{ se } 115^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (59)$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(0,98 - 0,03 \left(\frac{\theta_c - 200}{200} \right) \right), \text{ se } 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (60)$$

$$\rho(\theta_c) = \rho(20^\circ\text{C}) \left(0,95 - 0,07 \left(\frac{\theta_c - 400}{800} \right) \right), \text{ se } 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (61)$$

- Betão com agregados leves:

$$\rho_{LC}(20^\circ\text{C}) = 1200 \text{ a } 2000 \quad (62)$$

4.1.3.2. Propriedades mecânicas: betão

Betão em compressão:

As propriedades de resistência e deformação do betão sob tensão uniaxial exposto a temperaturas elevadas poderão ser obtidas através das relações tensão-extensão apresentadas na Figura 8.

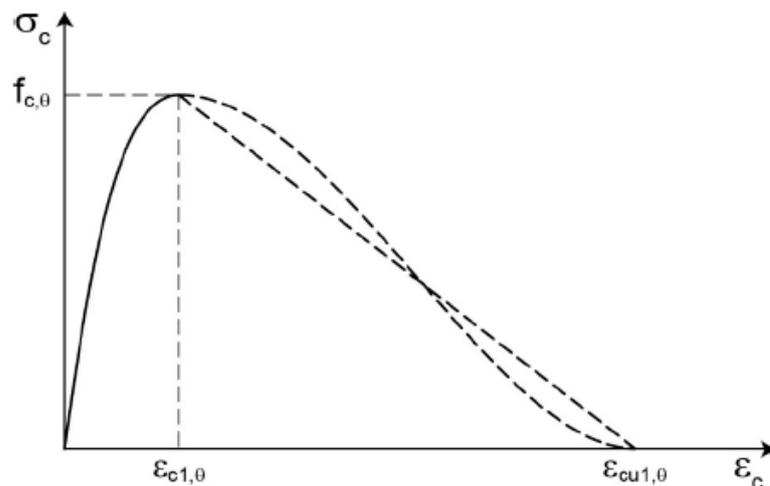


Figura 8. Diagrama de tensões-extensões do betão a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020)

A relação tensão-extensão do betão representadas na Figura 8 poderá ser dividida em três parâmetros: resistência à compressão ($f_{c,\theta}$), a extensão correspondente à resistência à

compressão ($\varepsilon_{c1,\theta}$) e a extensão limite última ($\varepsilon_{cu1,\theta}$). Estes parâmetros poderão ser obtidos para um betão com agregados siliciosos, com agregados calcários ou com agregados de qualquer tipo pela Tabela A e por intermédio de interpolações matemáticas.

“Para as ações térmicas, segundo a EN 1991-1-2, ao ser considerado a fase de arrefecimento, a resistência do betão aquecido a uma temperatura máxima, $\theta_{c,max}$, e após ter arrefecido para uma temperatura de 20°C” (CEN, 2020), poderá ser obtido através da seguinte equação (63):

$$f_{c,\theta,20^\circ C} = \varphi f_{ck} \quad (63)$$

onde:

- para $f_{ck} < 70\text{MPa}$:

$$\varphi = f_{c,\theta_{max}}/f_{ck}, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_{c,max} < 100^\circ\text{C} \quad (64)$$

$$\varphi = (-0,0005\theta_{c,max} + 1,05)(f_{c,\theta_{max}}/f_{ck}), \text{ se } 100^\circ\text{C} \leq \theta_{c,max} < 300^\circ\text{C} \quad (65)$$

$$\varphi = 0,9(f_{c,\theta_{max}}/f_{ck}), \text{ se } \theta_{c,max} \geq 300^\circ\text{C} \quad (66)$$

- para $f_{ck} \geq 70\text{MPa}$

$$\varphi = f_{c,\theta_{max}}/f_{ck}, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_{c,max} < 1200^\circ\text{C} \quad (67)$$

Resistência à tração, $k_{ct,\theta}$.

Se a resistência à tração não for especificada, deverá ser ignorada. No caso da resistência à tração ser considerada, o coeficiente de redução do valor característico da tensão de rotura do betão à tração, $k_{ct,\theta}$, deverá ser obtido pela equação (68). Na ausência de informações $k_{ct,\theta}$ deverá ser calculado pelas equações (69) e (70).

$$k_{ct,\theta} = \frac{f_{ct,\theta}}{f_{ct}} \quad (68)$$

$$k_{ct,\theta} = 1,0, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \quad (69)$$

$$k_{ct,\theta} = (600 - \theta_c)/500, \text{ se } 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 600^\circ\text{C} \quad (70)$$

Extensão térmica, ε_{cth} :

- Betão com agregados siliciosos

$$\varepsilon_{cth}(\theta_c) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta_c + 2,3 \times 10^{-11} \theta_c^3, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C} \quad (71)$$

$$\varepsilon_{cth}(\theta_c) = 14 \times 10^{-3}, \text{ se } 700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (72)$$

- Betão com agregados calcários

$$\varepsilon_{cth}(\theta_c) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta_c + 1,4 \times 10^{-11} \theta_c^3, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C} \quad (73)$$

$$\varepsilon_{cth}(\theta_c) = 12 \times 10^{-3}, \text{ se } 805^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (74)$$

- Betão com agregados leves

$$\varepsilon_{cth}(\theta_c) = 8 \times 10^{-6} (\theta_c - 20), \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (75)$$

4.1.3.3. Propriedades mecânicas: aço para betão armado

Propriedades de resistência e deformação

Pela EN 1992-1-2 de 2020, as propriedades de resistência e deformação do aço para betão armado a temperaturas elevadas poderão ser obtidas através das relações de relação tensão-extensão apresentadas na Figura 9 e Figura 10.

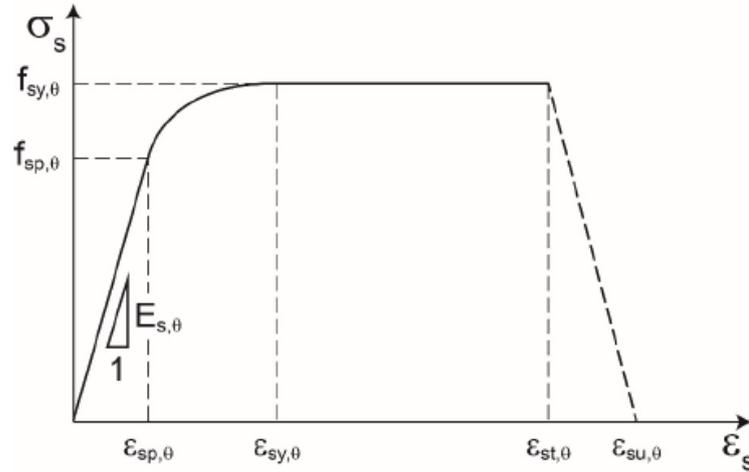


Figura 9. Diagrama de tensões-extensões do aço para betão armado a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).

Range	Stress		
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\sigma_s(\theta) = \varepsilon_s E_{s,\theta}$		
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$\sigma_s(\theta) = f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}$		
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$\sigma_s(\theta) = f_{sy,\theta}$		
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$\sigma_s(\theta) = f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$		
$\varepsilon_s = \varepsilon_{su,\theta}$	$\sigma_s(\theta) = 0,00$		
Parameter *)	Class A	Class B and C	
	$\varepsilon_{sy,\theta}$	0.02	0.02
	$\varepsilon_{st,\theta}$	0.05	0.15
	$\varepsilon_{su,\theta}$	0.10	0.20
*) Values for the parameters $\varepsilon_{st,\theta}$ and $\varepsilon_{su,\theta}$ for prestressing steel may be taken from Table 5.4. Class A, B and C reinforcement are defined in Annex C of EN 1992-1-1.			
Functions	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$		

Figura 10. Formulas para a relação tensão-extensão do aço para betão armado a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).

A relação tensão-extensão representa na Figura 9 pode ser dividida em três parâmetros: inclinação do domínio elástico linear ($E_{s,\theta}$), tensão limite de proporcionalidade ($f_{sp,\theta}$) e nível máximo das tensões ($f_{sy,\theta}$). Estes parâmetros poderão ser obtidos para aço laminado a quente e para aço endurecido a frio pela Tabela B e por intermédio de interpolações matemáticas. No

caso de não ser especificado o processo de fabrico do aço (laminado a quente ou endurecido a frio), este deverá tomar os valores de aço endurecido a frio.

Extensão térmica, $\varepsilon_s(\theta_s)$:

$$\varepsilon_s(\theta_s) = -2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \theta_s + 0,4 \times 10^{-8} \theta_s^2, \text{ se } 20^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 750^\circ\text{C} \quad (76)$$

$$\varepsilon_s(\theta_s) = 11 \times 10^{-3}, \text{ se } 750^\circ\text{C} < \theta_s \leq 860^\circ\text{C} \quad (77)$$

$$\varepsilon_s(\theta_s) = -6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta_s, \text{ se } 860^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1200^\circ\text{C} \quad (78)$$

4.1.4. Vigas

A EN 1992-1-2, de 2020, encontram-se apresentadas tabelas para vigas expostas ao fogo em três faces, pois a face superior da viga encontra-se isolado por lajes ou outros elementos que permitem com que esta conserve a sua função de isolamento durante a resistência ao fogo pretendida. Para vigas com todas as faces expostas ao fogo, a EN 1992-1-2 de 2020 apresenta um conjunto de condições que deveram ser cumpridas aquando da verificação de segurança ao fogo.

Para vigas com secção transversal em “T” com alma de largura variável, a sua largura b e a largura mínima obtida nas tabelas, b_{min} , deverá ser considerada ao nível do centro de gravidade das armaduras de tração, como representado na Figura 5 (CEN, 2020).

Vigas com secção transversal em “I” deverá ser considerado uma altura eficaz do banzo inferior, d_{eff} , calculada através da equação (79). Esta altura eficaz não poderá ser inferior ao b_{min} tabelado.

$$d_{eff} = d_1 + 0,5d_2 \geq b_{min} \quad (79)$$

em que:

d_1 e d_2 alturas representadas na Figura 5.

Se a largura da viga, b , exceder em 1,4 vezes a espessura da alma, b_w , e $b \cdot d_{eff} < 2b_{min}^2$, a distância efetiva do eixo da armadura à face exposta ao fogo, a_{eff} , deverá ser aumentada segundo a equação (80).

$$a_{eff} = a \left(1,85 - \frac{d_{eff}}{b_{min}} \sqrt{\frac{b_w}{b}} \right) \geq a \quad (80)$$

No caso de existirem aberturas na alma da viga, a resistência ao fogo não será afetada se a área da restante secção transversal do elemento na zona tracionada não seja inferior a:

$$A_c = 2b_{min}^2 \quad (81)$$

4.1.4.1. Simplesmente apoiada

Para a efetuar a verificação da resistência ao fogo de uma viga simplesmente apoiada será necessário primeiramente, calcular a distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo, a , pela equação (12) e consoante o tipo de secção transversal (em “T”, em “T” com uma alma de largura variável ou em “I”) deverão ser usadas as equações (79), (80) e (81).

Com a resistência ao fogo (R) para a qual se pretende verificar a segurança da viga, a largura da viga (b), a espessura da alma (b_w), a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 11 e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para b_{min} , a_{min} e $b_{w,min}$ para a respetiva resistência ao fogo.

Se a largura da viga, b , for maior que a largura mínima, b_{min} , apresentada na coluna a azul da Tabela 11, a distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo da viga com apenas uma única camada de armadura deverá ser calculada através da seguinte equação (82):

$$a_{sd} = a_{min} + 10mm \quad (82)$$

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. A viga encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

Tabela 11. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo padrão, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)								Espessura da alma $b_{w,min}$
	Combinações possíveis de a e b_{min} em que a é a distância média ao eixo e b_{min} é a largura da viga								
30	b_{min}	80	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	200	80
	a_{min}	25	a_{min}	20	a_{min}	15*	a_{min}	15*	
60	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	200	b_{min}	300	100
	a_{min}	40	a_{min}	35	a_{min}	30	a_{min}	25	
90	b_{min}	150	b_{min}	200	b_{min}	300	b_{min}	400	110
	a_{min}	55	a_{min}	45	a_{min}	40	a_{min}	35	
120	b_{min}	200	b_{min}	240	b_{min}	300	b_{min}	500	120
	a_{min}	65	a_{min}	60	a_{min}	55	a_{min}	50	
180	b_{min}	240	b_{min}	300	b_{min}	400	b_{min}	600	140
	a_{min}	80	a_{min}	70	a_{min}	65	a_{min}	60	
240	b_{min}	280	b_{min}	350	b_{min}	500	b_{min}	700	160
	a_{min}	90	a_{min}	80	a_{min}	75	a_{min}	70	

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

4.1.4.2. Contínua

A verificação da resistência ao fogo de uma viga contínua poderá ser efetuada através do uso da Tabela 12. Para tal, devem ser verificadas as seguintes condições:

- forem respeitadas as regras construtivas referidas na secção 9.3 da EN 1992-1-2 de 2020;
- a redistribuição dos momentos fletores para o cálculo à temperatura ambiente, de acordo com a EN 1992-1-1 não excede 15%;

Caso não seja verificada alguma destas condições a viga deverá ser considerada como simplesmente apoiada.

A espessura da alma de uma secção transversal (b_w) em “I”, não deverá ser inferior à espessura mínima da alma ($b_{w,min}$) apresentada na Tabela 12 para uma distância de duas vezes a altura da alma (h) a partir de um apoio intermédio.

Se a largura da viga, b , for maior que a largura mínima, b_{min} , apresentada na coluna a azul da Tabela 12, a distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo da viga com apenas uma única camada de armadura deverá ser calculada através da seguinte equação (82).

Tabela 12. Dimensões e distâncias mínimas ao eixo de vigas contínuas de betão armado.

Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo padrão, R (min)	Dimensões Mínimas (mm)								Espessura da alma $b_{w,min}$	Espessura da alma $b_{w,min}$ para um comprimento de 2h para um apoio intermédio
	Combinações possíveis de a e b_{min} em que a é a distância média ao eixo e b_{min} é a largura da viga									
30	b_{min}	80	b_{min}	160					80	80
	a_{min}	15*	a_{min}	12*						
60	b_{min}	120	b_{min}	200				100	120	
	a_{min}	25	a_{min}	12*						
90	b_{min}	150	b_{min}	250				110	150	
	a_{min}	35	a_{min}	25						
120	b_{min}	200	b_{min}	300			b_{min}	500	120	200
	a_{min}	45	a_{min}	35			a_{min}	30		
180	b_{min}	240	b_{min}	400	b_{min}	550	b_{min}	600	140	240
	a_{min}	60	a_{min}	50	a_{min}	45	a_{min}	40		
240	b_{min}	280	b_{min}	500	b_{min}	650	b_{min}	700	160	280
	a_{min}	75	a_{min}	60	a_{min}	55	a_{min}	50		

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

De forma a prevenir que no primeiro apoio intermédio de uma viga contínua haja rotura por compressão do betão ou rotura por esforço transverso, a largura mínima da secção transversal (b_{min}) e a espessura mínima da alma ($b_{w,min}$) deverá ser aumentada para as resistências de 120, 180 e 240 minutos de acordo com a Tabela 13 e se as seguintes condições sejam verificadas:

- não deverá existir resistência à flexão no apoio de extremidade;
- no primeiro apoio intermédio: $V_{Ed} > 2/3 V_{Rd,max}$, em que V_{Ed} é o valor de cálculo do esforço transverso à temperatura ambiente e $V_{Rd,max}$ é o valor de cálculo do esforço transverso resistente.

Tabela 13. Aumento da largura da viga e da espessura da alma para vigas contínuas.

Retirado e traduzido de CEN (2020).

Dimensões Mínimas (mm)	
Resistência ao fogo padrão, R (min)	Largura da viga b_{min} e espessura da alma $b_{w,min}$
120	220
180	380
240	480

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a largura da viga (b), a espessura da alma (b_w) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 12, a Tabela 13 (se as condições forem verificadas) e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para b_{min} , a_{min} e $b_{w,min}$ para a respetiva resistência ao fogo.

Através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. No caso da temperatura crítica seja inferior a 400°C deverá ser determinado um b_{mod} através da equação (16). A viga contínua encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.4.3. Todas as faces expostas ao fogo

Para a verificação da resistência ao fogo de uma viga com todas as faces expostas ao fogo, podem ser aplicadas as tabelas e as condições referidas anteriormente para as vigas simplesmente apoiadas e para as vigas contínuas. Deverão ainda ser consideradas as seguintes condições:

- a) a altura da viga não deverá ser inferior à largura mínima tabelada (b_{min}) para a resistência ao fogo pretendida;
- b) a área da seção transversal deverá ser maior que $A_c = 2b_{min}^2$, sendo b_{min} a largura mínima tabelada para a resistência ao fogo pretendida.

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a largura da viga (b), a espessura da alma (b_w) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13 (se

as condições forem verificadas) e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para b_{min} , a_{min} e $b_{w,min}$ para a respetiva resistência ao fogo.

Por fim, através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. No caso da temperatura crítica seja inferior a 400°C deverá ser determinado um b_{mod} através da equação (16). A viga contínua ou simplesmente apoiada com todas as faces expostas ao fogo encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.5. Lajes

A EN 1992-1-2, de 2020, permite efetuar a verificação da resistência ao fogo de lajes simplesmente apoiadas, contínuas, fungiformes e nervuradas.

Antes de efetuar a verificação da resistência ao fogo, deverão ser determinadas as espessuras das camadas constituintes de uma laje como representado na Figura 11, onde:

- h_1 – espessura da laje de betão;
- h_2 – espessura do isolamento acústico;
- h_3 – espessura do revestimento.



Figura 11. Laje de betão armado com isolamento acústico e revestimentos. Retirado e traduzido de CEN (2020).

A espessura total da laje, h_s , corresponde ao somatório de todas as espessuras das camadas:

$$h_s = h_1 + h_2 + h_3 \quad (83)$$

A espessura total mínima da laje, $h_{s,min}$, obtida pela Tabela 14 garante uma função de compartimentação (critério E e D).

A orientação da armadura deverá ser calculada através das seguintes equações (84) e (85):

$$\frac{l_y}{l_x} \leq 2, \text{Bidireccional} \quad (84)$$

$$\frac{l_y}{l_x} > 2, \text{Unidireccional} \quad (85)$$

em que:

l_y vão maior da laje;

l_x vão menor da laje.

4.1.5.1. Maciça simplesmente apoiada

Para lajes maciças simplesmente apoiadas, a verificação da resistência ao fogo deverá ser verificada com o uso da Tabela 14.

Tabela 14. Espessura e distâncias mínimas ao eixo de lajes maciças simplesmente apoiadas de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo padrão, REI (min)	Dimensões Mínimas (mm)			
	Espessura da laje $h_{s,min}$	Distância ao eixo a_{min}		
		Lajes armadas numa só direção	Lajes armadas em duas direções	
			$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 < l_y/l_x \leq 2$
30	60	10*	10*	10*
60	80	20	10*	15*
90	100	30	15*	20
120	120	40	20	25
180	150	55	30	40
240	175	65	40	50

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante. Nota: Lajes armadas em duas direções deveram estar apoiadas nos quatro cantos, caso não o sejam deveram ser consideradas como armadas numa só direção.

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a orientação da armadura principal (armada em duas direções (bidireccional) ou armada numa só direção (unidireccional)), a espessura total da laje (h_s) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 14 e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para $h_{s,min}$ e a_{min} para a respetiva resistência ao fogo.

Por fim, através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A, deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. A laje maciça simplesmente apoiada encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.5.2. Maciça contínua

Para a verificação da resistência ao fogo de uma laje maciça deverão ser utilizadas as colunas “Espessura da laje h ” e “ $l_x/l_y \leq 1,5$ ” (referente a lajes armadas em duas direções). Estas colunas só poderão ser utilizadas se as seguintes condições forem verificadas:

- a) forem respeitadas as regras construtivas referidas na secção 9.3 da EN 1992-1-2 de 2020;
- b) não é requerida a existência da redistribuição de momentos fletores à temperatura ambiente para a classe A de ductilidade da armadura;
- c) a redistribuição de momentos fletores não deverá ser superior a 15% para as classes B e C de ductilidade da armadura.

Se estas condições não forem verificadas, as lajes maciças contínuas deverão ser tratadas como lajes maciças simplesmente apoiadas.

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a espessura total da laje (h_s) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 14 e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para $h_{s,min}$ e a_{min} para a respetiva resistência ao fogo.

Por fim, através das equações (13), (14), (15) e a Tabela A deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. A laje maciça contínua encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.5.3. Fungiforme

A altura total de uma laje fungiforme deverá considerar os acabamentos de pavimento existentes. Se a redistribuição dos momentos à temperatura ambiente de uma laje fungiforme exceder 15% (segundo a EN 1992-1-1), o valor da distância ao eixo das armaduras (a) deverá ser considerado como igual ao de uma laje maciça simplesmente apoiada com armadura numa só direção, devendo ser utilizada a Tabela 14. Caso contrário, deverá ser usada a Tabela 15.

Tabela 15. Espessura e distância mínimas ao eixo de lajes fungiformes de betão armado.

Retirado e traduzido de (CEN, 2020).

Resistência ao fogo padrão, REI (min)	Dimensões mínimas (mm)	
	Espessura da laje $h_{s,min}$	Distância do eixo a_{min}
30	150	10*
60	180	15*
90	200	25
120	200	35
180	200	45
240	200	50

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a espessura total da laje (h_s) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar a Tabela 15 e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para $h_{s,min}$ e a_{min} para a respetiva resistência ao fogo.

Por fim, através das equações (13), (14), (15) e da Tabela A deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida. A laje fungiforme encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a .

4.1.5.4. Nervurada

A verificação da resistência ao fogo nas lajes nervuradas deverá efetuada dividindo-a em banzo e nervura. Para esta divisão deverá ser considerada a orientação da armadura principal da laje: armada numa só direção e armada em duas direções.

Para lajes nervuradas contínuas armadas numa só direção:

- as nervuras deverão ser consideradas como vigas contínuas. A verificação da resistência ao fogo deverá ser feita tendo em conta todas as condições e tabelas correspondentes a vigas contínuas;
- os banzos deverão ser considerados como lajes maciças contínuas. A verificação da resistência ao fogo deverá ser feita tendo em conta as condições e tabelas correspondentes a lajes maciças.

Para lajes nervuradas simplesmente apoiadas armadas numa só direção:

- as nervuras deverão ser consideradas como vigas simplesmente apoiadas. A verificação da resistência ao fogo deverá ser feita tendo em conta as condições e tabelas correspondentes às vigas simplesmente apoiadas.
- os banzos deverão ser usados as colunas “Espessura da laje, h ” e “ $1,5 < l_x/l_y \leq 1,5$ ” (referente a lajes armadas em duas direções) da Tabela 14 para lajes maciças simplesmente apoiadas.

Para as lajes nervuradas armadas em duas direções:

- simplesmente apoiada deverá usar a Tabela 16;
- com um ou mais bordos encastrados e se forem respeitadas as regras construtivas referidas na secção 9.3 (1) e 9.3(4) da EN 1992-1-2 de 2020, deverá ser usada a Tabela 17.

Se estas condições não forem verificadas, as lajes nervuradas armadas em duas direções deverão ser tratadas como lajes nervuradas armadas em duas direções simplesmente apoiadas.

A distância ao eixo da armadura da nervura e a superfície lateral da nervura exposta ao fogo deverá ser calculada através da equação (82).

Tabela 16. Espessura e distância mínimas ao eixo para lajes nervuradas simplesmente apoiadas, armadas em duas direções, de betão armado. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo padrão (min)	Dimensões mínimas (mm)						Espessura do banzo da laje $h_{s,min}$ e distância ao eixo a no banzo	
	Combinações possíveis da largura das nervuras b_{min} e da distância ao eixo a_{min}							
30	b_{min}	80					$h_{s,min}$	80
	a_{min}	15*					a_{min}	10*
60	b_{min}	100	b_{min}	120	b_{min}	≥ 200	$h_{s,min}$	80
	a_{min}	35	a_{min}	25*	a_{min}	15*	a_{min}	10*
90	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	≥ 250	$h_{s,min}$	100
	a_{min}	45	a_{min}	40	a_{min}	30*	a_{min}	15*
120	b_{min}	160	b_{min}	190	b_{min}	≥ 300	$h_{s,min}$	120
	a_{min}	60	a_{min}	55	a_{min}	40	a_{min}	20
180	b_{min}	220	b_{min}	260	b_{min}	≥ 410	$h_{s,min}$	150
	a_{min}	75	a_{min}	70	a_{min}	60	a_{min}	30
240	b_{min}	280	b_{min}	350	b_{min}	≥ 500	$h_{s,min}$	175
	a_{min}	90	a_{min}	75	a_{min}	70	a_{min}	40

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

Tabela 17. Espessura e distância mínimas ao eixo para lajes nervuradas simplesmente apoiadas, armadas em duas direções, de betão armado com pelo menos um bordo encastrado. Retirado e traduzido de CEN (2020)

Resistência ao fogo padrão (min)	Dimensões mínimas (mm)						Espessura do banzo da laje $h_{s,min}$ e distância ao eixo a no banzo	
	Combinações possíveis da largura das nervuras b_{min} e da distância ao eixo a_{min}							
30	b_{min}	80					$h_{s,min}$	80
	a_{min}	10*					a_{min}	10*
60	b_{min}	100	b_{min}	120	b_{min}	≥ 200	$h_{s,min}$	80
	a_{min}	25	a_{min}	15*	a_{min}	10*	a_{min}	10*
90	b_{min}	120	b_{min}	160	b_{min}	≥ 250	$h_{s,min}$	100
	a_{min}	35	a_{min}	25	a_{min}	15*	a_{min}	15*
120	b_{min}	160	b_{min}	190	b_{min}	≥ 300	$h_{s,min}$	120
	a_{min}	45	a_{min}	40	a_{min}	30	a_{min}	20
180	b_{min}	310	b_{min}	600			$h_{s,min}$	150
	a_{min}	60	a_{min}	50			a_{min}	30
240	b_{min}	450	b_{min}	700			$h_{s,min}$	175
	a_{min}	70	a_{min}	60			a_{min}	40

*) O recobrimento especificado na EN 1992-1-1 é, em geral, condicionante.

Com a resistência ao fogo (R) pretendida, a espessura total da laje (h_s) e a distância ao eixo da armadura (a), poder-se-á utilizar as tabelas indicadas (nervuras e banzos) e interpolações matemáticas de forma a encontrar o valor mínimo para $h_{s,min}$, b_{min} e a_{min} para a respetiva resistência ao fogo.

Por fim, através das equações (13), (14), (15) e da Tabela A deverá ser calculado o novo valor da distância ao eixo das armaduras corrigida para nervura e banzo. A laje nervurada encontrar-se-á em segurança se a distância ao eixo das armaduras corrigida, tanto para a nervura como para o banzo, for menor que a distância ao eixo da armadura inicialmente calculado, a (para banzo e nervura).

4.2. Método de Cálculo Simplificado

O método de cálculo simplificado baseia-se no cálculo de esforços axiais e momentos fletores em situação de incêndio com os quais se pode verificar a segurança da resistência ao fogo.

Visto este método considerar os esforços e momentos fletores em situação de incêndio, será necessário determinar a temperatura para a secção transversal, pelo que a EN 1992-1-2 de 2020 disponibiliza um conjunto de equações que possibilita o seu cálculo.

Pelo método de cálculo simplificado, a espessura da zona danificada pelo fogo num elemento estrutural, a_z , deverá ser calculada pela seguinte equação:

$$a_z = \begin{cases} 0,011 \times \sqrt{1 + \frac{R_{fi} - 27}{27} \times \sqrt{\frac{w}{0,0125}}}, & \text{para } 0,075 \leq w < 0,20 \\ 0,011 \times \sqrt{1 + 4 \times \frac{R_{fi} - 27}{27}}, & \text{para } w \geq 0,20 \end{cases} \quad (86)$$

em que:

- R_{fi} duração do incêndio padrão;
- w dimensão da seção transversal usada para obter a seção transversal reduzida dependendo da exposição ao fogo. Deverá ser obtido como demonstrado pela Figura 12.

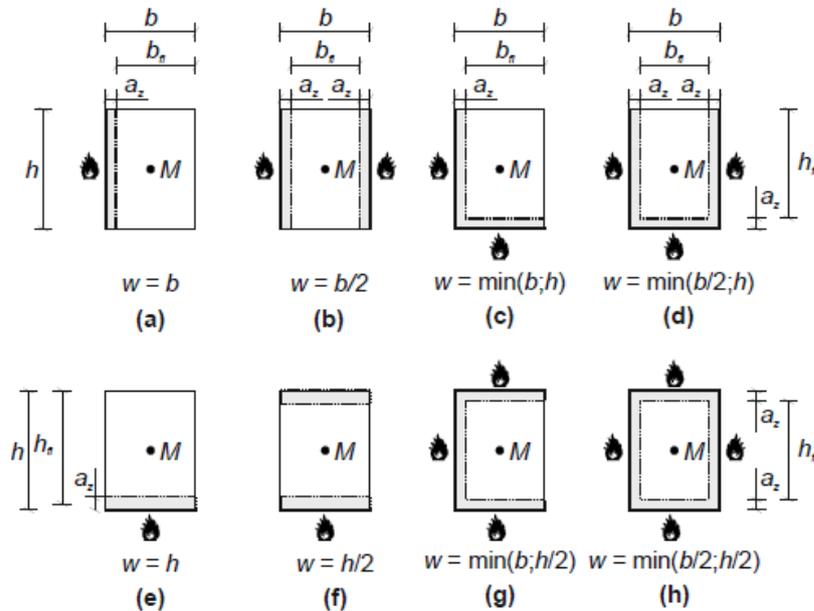


Figura 12. Zona danificada de uma seção transversal exposta ao fogo. Retirado de CEN (2020).

4.2.1. Perfis de temperatura

A EN 1992-1-2 de 2020, fornece equações que permitem determinar os perfis de temperatura para um elemento estrutural em situação de incêndio. Estas equações dependem da geometria da seção transversal e do número de faces expostas ao fogo. Para o cálculo da temperatura em seções transversais onde $b/b_w > 2$ (por exemplo, seções transversais em “I”) ou $h/b > 2$, a seção transversal deverá ser dividida em subseções retangulares.

Todas as temperaturas obtidas encontram-se em °C.

4.2.1.1. Uma face exposta ao fogo

Para a utilização das equações (87) e (88) referentes a um elemento estrutural com uma face exposta ao fogo, deverá ser verificada a espessura mínima da secção transversal através da Tabela 18.

Tabela 18. Espessura mínima de um elemento estrutural com uma face exposta ao fogo.

Retirado e traduzido de CEN (2020).

Resistência ao fogo, R (min)	30	60	90	120	180	240
Espessura mínima para uma secção transversal com uma face exposta ao fogo (mm)	60	70	100	120	150	200

Temperatura de um elemento estrutural com uma face exposta ao fogo, $\theta(x, R_{fi})$:

$$\theta(x, R_{fi}) = \theta_1(x, R_{fi}) + 20 \quad (87)$$

onde:

$$\theta_1(x, R_{fi}) = 345 \times \log_{10} \left(\frac{7(R_{fi} - \Delta R_{fi})}{60} + 1 \right) \cdot e^{\left(-x \sqrt{\frac{0,9k}{R_{fi}}} \right)} \quad (88)$$

em que:

R_{fi} duração do incêndio padrão (em segundos). Deverá ser igual ou maior que 1800 segundos;

x distância à face exposta ao fogo (em metros);

ΔR_{fi} atraso entre a temperatura do compartimento em fogo e a temperatura da superfície do betão para os efeitos de convecção e radiação. Deverá ser considerado igual a 720 segundos.

$k = \rho \times \frac{c_p}{\lambda} = 3,3 \times 10^6 \text{ s/m}^2$ recalibração para ajustar as curvas da temperatura.

4.2.1.2. Duas faces expostas ao fogo

As seguintes equações (89) e (91) podem ser aplicadas a um elemento estrutural que se encontra com duas faces expostas ao fogo. Estas equações encontram-se divididas em dois casos como representado na Figura 13.

Estas são usadas, maioritariamente no cálculo da temperatura de paredes e lajes exposta ao fogo em duas faces.

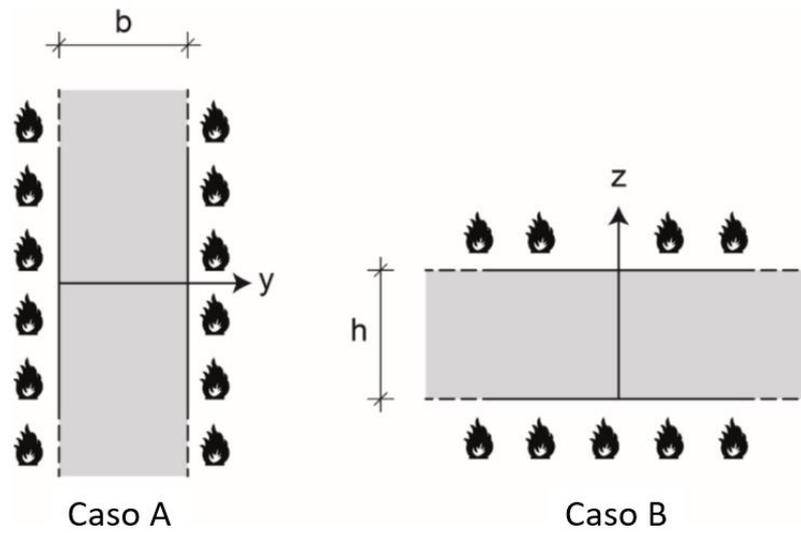


Figura 13. Sistema de coordenadas para secções transversais com duas faces expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).

Temperatura de um elemento estrutural com duas faces expostas ao fogo para o caso A:

$$\theta(y, R_{fi}) = \theta_2(y, R_{fi}) + 20 \quad (89)$$

onde:

$$\theta_2(y, R_{fi}) = \theta_1(y, R_{fi}) + \theta_1(b - y, R_{fi}) \quad (90)$$

em que:

- y distância à face exposta ao fogo no eixo y ;
- b largura da secção transversal.

Temperatura de um elemento estrutural com duas faces expostas ao fogo para o caso B:

$$\theta(z, R_{fi}) = \theta_2(z, R_{fi}) + 20 \quad (91)$$

onde:

$$\theta_2(z, R_{fi}) = \theta_1(z, R_{fi}) + \theta_1(h - z, R_{fi}) \quad (92)$$

em que:

- z distância à face exposta ao fogo no eixo z ;
- h altura da secção transversal.

4.2.1.3. Três faces expostas ao fogo

Para um elemento transversal com três faces expostas ao fogo, a sua temperatura deverá ser calculada através da seguinte equação (93):

$$\theta(y, z, R_{fi}) = \theta_2(y, R_{fi}) + \theta_1(z, R_{fi}) - \frac{\theta_2(y, R_{fi}) \times \theta_1(z, R_{fi})}{\theta_1(0, R_{fi})} + \Delta\theta(y', z', R_{fi}) + 20 \quad (93)$$

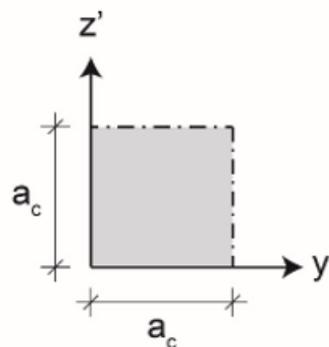
em que:

$\Delta\theta(y', z', R_{fi})$ efeito local nos cantos da secção transversal onde os efeitos da convecção e radiação no início do incêndio são reduzidos. Poderá ser calculado pela seguinte equação:

$$\Delta\theta(y', z', R_{fi}) = \left(345 \times \log_{10} \left(\frac{8R_{fi}}{60} + 1 \right) - \theta_1(0, R_{fi}) \right) \times \frac{(a_c - y') \times (a_c - z')}{a_c^2} \quad (94)$$

a_c dimensão da zona do canto exposta ao fogo em dois lados (Figura 14). Este deverá ser considerado igual a:

- 0,04 metros para uma resistência ao fogo até 60 minutos;
- 0,10 metros para uma resistência ao fogo superior a 60 minutos.



Sistema de coordenadas
para os cantos

Figura 14. Sistema de coordenadas para os cantos. Retirado de e traduzido de CEN (2020).

y' distância à face exposta ao fogo de um canto no eixo y' . Este deverá ser inferior a a_c ;

z' distância à face exposta ao fogo de um canto no eixo z' . Este deverá ser inferior a a_c .

4.2.1.4. Quatro faces expostas ao fogo

Para elementos estruturais com quatro faces expostas ao fogo (Figura 15), a sua temperatura poderá ser calculada pela seguinte equação:

$$\theta(y, z, R_{fi}) = \theta_2(y, R_{fi}) + \theta_2(z, R_{fi}) - \frac{\theta_2(y, R_{fi}) \cdot \theta_2(z, R_{fi})}{\theta_1(0, R_{fi})} + \Delta\theta(y', z', R_{fi}) + 20 \quad (95)$$

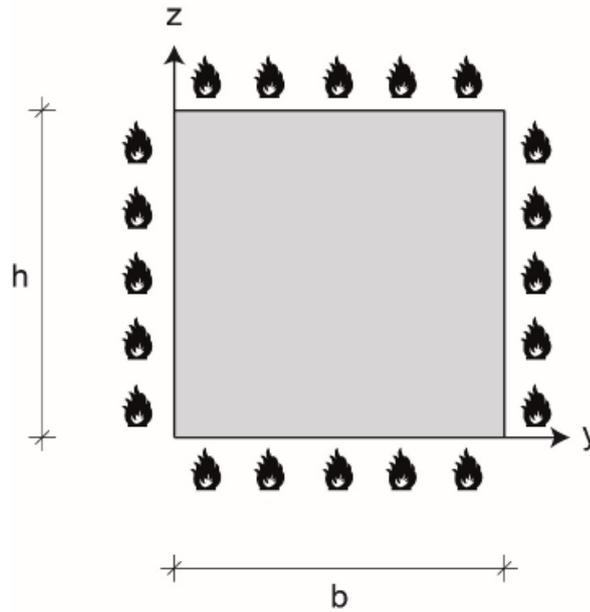


Figura 15. Seção transversal com quatro faces expostas ao fogo. Retirado e traduzido de CEN (2020).

4.2.1.5. Seção transversal circular exposta ao fogo

Para secções transversais circulares expostas ao fogo na sua totalidade, a temperatura a uma distância x da superfície poderá ser obtida pela seguinte equação:

$$\theta(x, R_{fi}) = \theta_1(x, R_{fi}) + \Delta\theta_M(R_{fi}) \times \left[1 - \left(\frac{\theta_1(x, R_{fi})}{\theta_1(0, R_{fi})} \right)^2 \right] + 20 \quad (96)$$

onde:

$$\theta_1(0, R_{fi}) = 345 \times \log_{10} \left(\frac{8 \times (R_{fi} - \Delta R_{fi})}{60} + 1 \right) \quad (97)$$

$$\theta_1(x, R_{fi}) = \theta_1(0, R_{fi}) \times \left[e^{\left(\frac{-x \sqrt{0,72 \times \frac{k}{R_{fi}}}}{\sqrt{0,72 \times \frac{k}{R_{fi}}}} \right)} + e^{\left(\frac{-(b-x) \sqrt{0,72 \times \frac{k}{R_{fi}}}}{\sqrt{0,72 \times \frac{k}{R_{fi}}}} \right)} \right], \quad x \leq \frac{1}{2} b \quad (98)$$

$$\Delta\theta_M(R_{fi}) = \theta_1(0, R_{fi}) \times e^{\left(-\frac{1}{2} \times b \times \sqrt{0,72 \times \frac{k}{R_{fi}}}\right)} \quad (99)$$

em que:

- b diâmetro da secção transversal circular;
 $\Delta\theta_M$ aumento da temperatura na secção transversal circular.

4.2.2. Lajes

O cálculo da verificação da resistência ao fogo de uma laje exposta ao fogo deverá ser efetuado da seguinte forma:

1. Determinar o valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$) pela equação (10).
2. Calcular a espessura da zona danificada (a_z) e as novas dimensões para a secção transversal reduzida, nomeadamente, a altura reduzida (h_{fi}) e a altura efetiva reduzida (d_{fi}). A altura reduzida e a altura efetiva reduzida deverão ser calculadas tendo em conta o número de faces exposta ao fogo da laje (uma face ou duas faces expostas ao fogo) e, usando a Figura 12 como auxiliar para o seu cálculo.
3. Determinar a tensão de cedência à tração do aço em situação de incêndio ($f_{sy,\theta}$) para uma temperatura θ . Esta temperatura deverá ser calculada tendo em conta o número de faces exposta ao fogo:
 - uma face exposta ao fogo (superior ou inferior) deverá usar a equação (87);
 - duas faces exposta ao fogo (superior e inferior) deverá usar a equação (91).

O valor de $f_{sy,\theta}$ deverá ser determinado com o uso da Tabela B e interpolações matemáticas.

4. Determinar a extensão do betão para o membro mais comprimido ($|\varepsilon_{c0}|$).

$$|\varepsilon_{c0}| = 1,4\varepsilon_{c1,\theta} \quad (100)$$

O valor de $|\varepsilon_{c1,\theta}|$ deverá ser determinado com o uso da Tabela A e interpolações matemáticas.

5. Determinar as forças resistentes (força de compressão no betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$) e força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,t,fi}$)) e o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$). Deverão ser consideradas as equações de equilíbrio e as equações fornecidas pela EN 1992-1-2 de 2020.

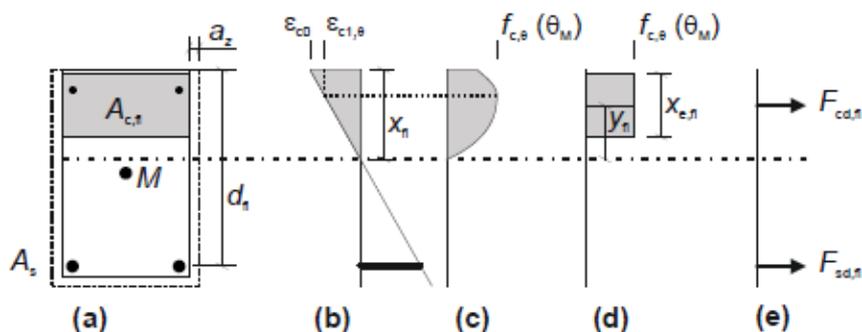


Figura 16. Representação da tensão e deformação na zona comprimida, (a) secção transversal reduzida, (b) distribuição da deformação, (c) distribuição da tensão do betão na zona comprimida, (d) simplificação da distribuição da tensão do betão na zona comprimida e (e) esforços da secção reduzida. Retirado de CEN (2020)

$$\text{Equação de equilíbrio: } \begin{cases} F_{sd,t,fi} = F_{cd,fi} \\ M_{rd,fi} = F_{sd,t,fi} \times z_i \end{cases} \quad (101)$$

onde:

$$F_{sd,t,fi} = A_s \times f_{sy,\theta} \quad (102)$$

$$F_{cd,fi} = A_{c,fi} \times f_{c,\theta}(\theta_M) \quad (103)$$

$$A_{c,fi} = b_{fi} \times x_{e,fi} \quad (104)$$

$$x_{e,fi} = 0,70x_{fi} \quad (105)$$

$$y_{fi} = 0,60x_{fi} \quad (106)$$

em que:

z_i distância entre a força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,t,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$);

A_s	área da armadura na zona tracionada da secção transversal reduzida;
$A_{c,fi}$	área da secção transversal reduzida comprimida exposta ao fogo;
$x_{e,fi}$	altura efetiva do betão em compressão em situação de incêndio;
x_{fi}	distância do centro de massa da zona comprimida do betão à face exposta ao fogo;
y_{fi}	distancia do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio.

6. Verificar a segurança do elemento estrutural ao fogo. A resistência ao fogo é verificada se o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) for igual ou superior ao momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$).

4.2.3. Vigas

O cálculo da verificação da resistência ao fogo de uma viga exposta ao fogo deverá ser efetuado da seguinte forma:

1. Determinar o valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$) pela equação (10).
2. Calcular a espessura da zona danificada (a_z) e as novas dimensões para a secção transversal reduzida, nomeadamente, a altura reduzida (h_{fi}), a altura efetiva reduzida (d_{fi}) e a largura reduzida (b_{fi}). A altura reduzida, altura efetiva reduzida e a largura reduzida deverão ser calculadas tendo em conta o número de faces expostas ao fogo da viga (duas faces, três ou quatro expostas ao fogo) e, usando a Figura 12 como auxiliar para o seu cálculo.
3. Determinar a tensão de cedência à tração para cada varão em situação de incêndio ($f_{sy,\theta}$) para uma temperatura θ . Esta temperatura deverá ser calculada tendo em conta o número de faces exposta ao fogo:
 - duas faces exposta ao fogo deverá usar a equação (89) ou (91);
 - três faces expostas ao fogo deverá usar a equação (93);
 - quatro faces expostas ao fogo deverá usar a equação (95).

O valor de $f_{sy,\theta}$ deverá ser determinado com o uso da Tabela B e interpolações matemáticas.

4. Determinar a extensão do betão para o membro mais comprimido ($|\varepsilon_{c0}|$), usando a equação (100). O valor de $|\varepsilon_{c1,\theta}|$ deverá ser determinado com o uso da Tabela A e interpolações matemáticas.
5. Determinar as forças resistentes (força de compressão no betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$), força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,t,fi}$) e força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio ($F_{sd,c,fi}$)) e o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$). Deverão ser consideradas as equações de equilíbrio e as equações fornecidas pela EN 1992-1-2 de 2020.

$$\text{Equação de equilíbrio: } \begin{cases} F_{sd,t,fi} = F_{cd,fi} + F_{sd,c,fi} \\ M_{Rd,fi} = F_{sd,t,fi}z_i - F_{sd,c,fi}z_j \end{cases} \quad (107)$$

onde:

$$F_{sd,c,fi} = A_{sc} \times f_{sy,\theta} \quad (108)$$

$$F_{sd,t,fi} = A_s \times f_{sy,\theta} \quad (109)$$

$$F_{cd,fi} = A_{c,fi} \times f_{c,\theta}(\theta_M) \quad (110)$$

$$A_{c,fi} = b_{fi} \times x_{e,fi} \quad (111)$$

$$y_{fi} = 0,60x_{fi} \quad (112)$$

$$x_{e,fi} = 0,70x_{fi} \quad (113)$$

em que:

z_i distância entre a força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,t,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$);

z_j distância entre a força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,c,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$).

6. Verificar a segurança do elemento estrutural ao fogo. A resistência ao fogo é verificada se, o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) for igual ou superior ao momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$).

4.2.4. Pilares

O cálculo da verificação da resistência ao fogo de um pilar exposto ao fogo deverá ser efetuado da seguinte forma:

1. Determinar o valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$) e o valor de cálculo do esforço axial em situação de incêndio ($N_{Ed,fi}$) pela equação (10).
2. Calcular a espessura da zona danificada (a_z) e as novas dimensões para a secção transversal reduzida, nomeadamente, a altura reduzida (h_{fi}), a altura efetiva reduzida ($d_{fi} = d - a_z$), a largura reduzida (b_{fi}) e a distância reduzida do eixo da armadura ($a_{fi} = a - a_z$). A altura reduzida, a altura efetiva reduzida, a largura reduzida e a distância reduzida do eixo da armadura deverão ser calculadas tendo em conta o número de faces exposta ao fogo da viga e, usando a Figura 12 como auxiliar para o seu cálculo.
3. Determinar a tensão de cedência à tração para cada varão em situação de incêndio ($f_{sy,\theta}$) para uma temperatura θ . Esta temperatura deverá ser calculada tendo em conta o número de faces exposta ao fogo:
 - duas faces exposta ao fogo deverá usar a equação (89) ou (91);
 - três faces expostas ao fogo deverá usar a equação (93);
 - quatro faces expostas ao fogo deverá usar a equação (95).

O valor de $f_{sy,\theta}$ deverá ser determinado com o uso da Tabela B e interpolações matemáticas.

4. Determinar a extensão do betão para o membro mais comprimido ($|\varepsilon_{c0}|$).

$$|\varepsilon_{c0}| \leq \varepsilon_{c1,\theta} \text{ para } x_{fi} \leq (d_{fi} + a_{fi}) \quad (114)$$

$$|\varepsilon_{c0}| = \varepsilon_{c1,\theta} \text{ para } (d_{fi} + a_{fi}) < x_{fi} \leq 3 \times (d_{fi} + a_{fi}) \quad (115)$$

O valor de $|\varepsilon_{c1,\theta}|$ deverá ser determinado com o uso da Tabela A e interpolações matemáticas.

- Determinar as forças resistentes (força de compressão no betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$), força de tração resistente da armadura em situação de incêndio para $x_{fi} < d_{fi}$ ($F_{sd,1t,fi}$), força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio para $x_{fi} > d_{fi}$ ($F_{sd,1c,fi}$) e o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$). Deverão ser consideradas as equações de equilíbrio e as equações fornecidas pela EN 1992-1-2 de 2020.

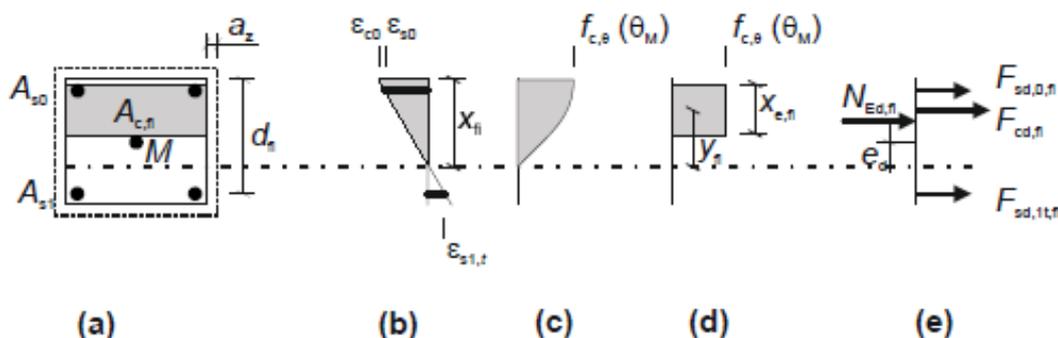


Figura 17. Representação da tensão e deformação na zona comprimida para $x_{fi} < d_{fi}$, (a) secção transversal reduzida, (b) distribuição da deformação, (c) distribuição da tensão do betão na zona comprimida, (d) simplificação da distribuição da tensão do betão na zona comprimida e (e) esforços da secção reduzida. Retirado de CEN (2020).

$$\text{Equação de equilíbrio: } \begin{cases} N_{Rd,fi} = F_{cd,fi} + F_{sd,0,fi} + F_{sd,1c,fi} - F_{sd,1t,fi} \\ M_{Rd,fi} = F_{sd,1t,fi}z_i + F_{sd,2t,fi}z_{i+1} - F_{sd,c,fi}z_j + N_{Rd,fi}e_d \end{cases} \quad (116)$$

onde:

$$F_{sd,0,fi} = \max \left\{ E_{s,\theta} A_{s0} \left(\varepsilon_{s0} - 1.35 \times 10^{-5} (\theta_{sc} - 20) \left(1 - \frac{a_{fi}}{d_{fi}} \right) \right); -A_{s0} f_{se,\theta} \right\} \quad (117)$$

$$F_{sd,1t,fi} = \min \{ E_{s,\theta} \varepsilon_{s1,t} A_{s1}; A_{s1} f_{se,\theta} \} \text{ se } x_{fi} < d_{fi} \quad (118)$$

$$F_{sd,1c,fi} = \max \{ E_{s,\theta} \varepsilon_{s1,c} A_{s1}; -A_{s1} f_{se,\theta} \} \text{ se } x_{fi} > d_{fi} \quad F_{cd,fi} = A_{c,fi} f_{c,\theta}(\theta_M) \quad (119)$$

$$F_{cd,fi} = A_{c,fi} \times f_{c,\theta}(\theta_M) \quad (120)$$

$$A_{c,fi} = b_{fi} \times x_{e,fi} \quad (121)$$

$$y_{fi} = \max \left(0.65; 0.55 + 0.10 \times \frac{x_{fi}}{d_{fi} + a_{fi}} \right) \times x_{fi} \quad (122)$$

$$x_{e,fi} = \min \left(0.60 \times \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{c1,\theta}}; 0.75 - 0.15 \times \frac{x_{fi}}{d_{fi} + a_{fi}} \right) \times x_{fi} \quad (123)$$

$$\theta_{sc} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n_{sc}} \theta_{sc,i}}{n_{sc}} \quad (124)$$

$$e_d = \frac{M_{Ed,fi}}{-N_{Ed,fi}} \quad (125)$$

em que:

$F_{sd,0,fi}$ força de compressão resistente da armadura longitudinal à distancia do eixo a do lado mais comprimido do pilar;

ε_{s0} e $\varepsilon_{s1,c}$ tensão de compressão nas camadas de armadura;

$\varepsilon_{s1,t}$ tensão de tração nas camadas de armadura;

A_{s0} e A_{s1} área da armadura da secção transversal;

θ_{sc} temperatura média de todas as armaduras na zona comprimida;

n_{sc} número de varões na zona comprimida;

e_d excentricidade máxima;

z_i e z_{i+1} distância entre a força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,1t,fi}$ e $F_{sd,2t,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$);

z_j distância entre a força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,c,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$).

6. Verificar a segurança do elemento estrutural ao fogo. A resistência ao fogo é verificada se, o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) for igual ou superior ao momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$).

4.2.5. Parede

O cálculo da verificação da resistência ao fogo de uma parede exposta ao fogo deverá ser efetuado da seguinte forma:

1. Determinar o valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$) e o valor de cálculo do esforço axial em situação de incêndio ($N_{Ed,fi}$) pela equação (10).
2. Calcular a espessura da zona danificada (a_z) e as novas dimensões para a secção transversal reduzida, nomeadamente, a altura reduzida (h_{fi}), a altura efetiva reduzida ($d_{fi} = d - a_z$), a largura reduzida (b_{fi}) e a distância reduzida do eixo da armadura ($a_{fi} = a - a_z$). A altura reduzida, a altura efetiva reduzida, a largura reduzida e a distância reduzida do eixo da armadura deverão ser calculadas tendo em conta o número de faces exposta ao fogo da viga e, usando a Figura 12 como auxiliar para o seu cálculo.
3. Determinar a tensão de cedência à tração para cada varão em situação de incêndio ($f_{sy,\theta}$) para uma temperatura θ . Esta temperatura deverá ser calculada tendo em conta o número de faces exposta ao fogo:
 - uma face exposta ao fogo deverá usar a equação (87)(89);
 - duas faces exposta ao fogo deverá usar a equação (89);

O valor de $f_{sy,\theta}$ deverá ser determinado com o uso da Tabela B e interpolações matemáticas.

4. Determinar a extensão do betão para o membro mais comprimido ($|\varepsilon_{c0}|$), pelas equações (114) e (115). O valor de $|\varepsilon_{c1,\theta}|$ deverá ser determinado com o uso da Tabela A e interpolações matemáticas.
5. Determinar as forças resistentes (força de compressão no betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$), força de tração resistente da armadura em situação de incêndio para $x_{fi} < d_{fi}$ ($F_{sd,1t,fi}$), força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio para $x_{fi} > d_{fi}$ ($F_{sd,1c,fi}$) e o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$). Deverão ser consideradas as equações de equilíbrio e as equações fornecidas pela EN 1992-1-2 de 2020.

$$\text{Equação de equilíbrio: } \begin{cases} N_{Rd,fi} = F_{cd,fi} + F_{sd,0,fi} + F_{sd,1c,fi} - F_{sd,1t,fi} \\ M_{Rd,fi} = F_{sd,1t,fi}y_i + F_{sd,2t,fi}y_{i+1} - F_{sd,c,fi}y_j + N_{Rd,fi}e_d \end{cases} \quad (126)$$

em que:

y_i e y_{i+1} distância entre a força de tração resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,1t,fi}$ e $F_{sd,2t,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$);

y_j distância entre a força de compressão resistente da armadura em situação de incêndio, ($F_{sd,c,fi}$) e a força de compressão do betão em situação de incêndio ($F_{cd,fi}$).

6. Verificar a segurança do elemento estrutural ao fogo. A resistência ao fogo é verificada se o momento resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$) for igual ou superior ao momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$).

5. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

Na criação e desenvolvimento do XD-Fire, foi usada a linguagem de programação C# (versão 8.0 lançada em setembro de 2019). Esta foi escolhida devido à sua fácil e rápida aprendizagem bem como a sua vertente orientada para a programação de objetos (POO).

O XD-Fire foi criado com o Microsoft Visual Studio Community 2019 e com a plataforma .NET Core (versão 3.1) nele incorporada.

5.1. Linguagem C#

A linguagem de programação C# foi apresentada em 2000 e lançada em 2002 com o Visual Studio .NET 2002 na sua versão 1.0 (Loureiro, 2017). Esta foi criada pelo engenheiro de software da Microsoft, Anders Hejlsberg e a sua equipa, de forma a integrar a plataforma .NET (Chan, 2015; Deitel et al., 2001; Perkins, Hammer, & Reid, 2018; Watson, Nagel, Pedersen, Reid, & Skinner, 2010).

A linguagem C# é considerada uma derivação e evolução de algumas linguagens de programação previamente existentes C, C++ e Java ou JavaScript. Esta veio corrigir alguns dos problemas existentes nestas linguagens de programação (Chan, 2015; Deitel et al., 2001; Perkins et al., 2018).

Devido à sua simplicidade e rapidez de aprendizagem, pois utiliza termos comuns ingleses, C# é considerada a linguagem básica de aprendizagem para um novo utilizador que nunca teve qualquer tipo de contacto com programação. Infelizmente esta tem um senão: necessita de mais código do que outras linguagens de programação, como por exemplo C++. Porém, isto fará com que o código seja mais detalhado, robusto e de rápido e simples *debugging* (Chan, 2015; Deitel et al., 2001; Perkins et al., 2018; Watson et al., 2010).

Atualmente, a versão disponibilizada pela Microsoft desta linguagem é a 11.0. O XD-Fire encontra-se programado com a versão 8.0 desta linguagem, pois aquando do seu processo de programação, esta era a versão mais recente do C#.

5.2..NET Core

A plataforma .NET *Framework* foi criada pela Microsoft e lançada em conjunto com a linguagem de programação C#. Esta é composta por uma vasta biblioteca de classes, designada por *Framework Class Library* (FCL), e por um sistema de execução virtual, designado por

Common Language Runtime (CLR) (Deitel et al., 2001; Perkins et al., 2018; Price, 2019; Trigo & Henriques, 2020; Watson et al., 2010).

Devido aos avanços tecnológicos e à necessidade de executar aplicações em qualquer sistema operativo, a Microsoft desenvolveu a plataforma .NET Core. Esta permite a execução de aplicações em qualquer sistema operativo (Windows, Linus, macOS), ao contrário da plataforma .NET *Framework* que só permitia a execução de aplicações no sistema operativo Windows (Price, 2019; Trigo & Henriques, 2020). Atualmente, a plataforma .NET Core chama-se .NET e encontra-se na versão 7.0.

O XD-Fire foi programado utilizando a plataforma .NET Core na versão 3.1.

5.3. Programação orientada a objetos (POO)

A programação orientada a objetos surgiu nos anos 60, com a linguagem de programação *Simula* e nos anos 70, surgiu a linguagem de programação *Smalltalk*. Devido à POO ser considerada relativamente nova, poucos foram os programadores que a adotaram. Com o surgimento das linguagens de programação C++ e Eiffel, a POO ganhou um novo destaque, pois estas linguagens possuíam uma vertente orientada a objetos. Em 2002, a Microsoft lançou a sua plataforma .NET Framework e a sua nova linguagem de programação: C#, totalmente orientada a objetos (Clark, 2013).

A POO veio aumentar a produtividade dos programadores na criação de novas aplicações, pois possibilita que um código ou objeto seja múltiplas vezes utilizado na mesma aplicação ou em aplicações diferentes. Com isto, projetos complexos e de difícil estruturação foram simplificados com a ajuda das características adjacentes a este tipo de programação. Neste tipo de programação, um programa consiste em diversos conjuntos de instruções e objetos que interagem entre si no desempenho de uma função, mantendo a individualidade de cada elemento constituinte. Noutros tipos de programação mais antigos e não orientados a objetos, um programa consistia num conjunto de instruções cujo objetivo era desempenhar uma única tarefa específica (Loureiro, 2017).

Na POO um objeto é “uma combinação de código e dados que pode ser manipulada como uma unidade” (Loureiro, 2017). Se considerarmos um objeto, por exemplo, um carro, este possui diversas características (tais como, cor, cilindrada, número de portas, entre outras mais) e funcionalidades (acelerar, travar, acender as luzes, entre outras). Estas características e funcionalidades são designadas respetivamente em POO como atributos e métodos. Logo,

podemos dizer que uma classe é composta pelos atributos e métodos que constituem um objeto (Loureiro, 2017; Perkins et al., 2018; Watson et al., 2010).

Existem quatro conceitos básicos para a utilização da POO:

- Abstração – consiste em mostrar apenas as características essenciais de um objeto ignorando os detalhes ou especificações irrelevantes. Por exemplo, ao acender um candeeiro, o resultado esperado é que haja luz naquele local, não interessando todo o processo que foi necessário para que obtivesse luz naquele candeeiro (Clark, 2013; Price, 2019; Trigo & Henriques, 2020);
- Encapsulamento – é o processo de atribuir regras de acesso aos atributos de um objeto. Por exemplo, um utilizador procede a uma encomenda online, desde o momento em que foi efetuado o pagamento, o utilizador não tem qualquer conhecimento interno de como é feito o embalamento, a recolha e o envio da mesma até esta chegar ao seu destino (Clark, 2013; Trigo & Henriques, 2020);
- Herança – permite a reutilização de código, sendo possível a construção de classes tendo como base outras já existentes. Considerando novamente o exemplo de um carro. Sempre que um carro novo seja construído, não será necessário reinventar novamente a roda. Sendo assim, qualquer carro novo poderá herdar as características e funcionalidades de outros já existentes (Loureiro, 2017; Trigo & Henriques, 2020);
- Polimorfismo – possibilita que dois ou mais objetos que, possuem métodos com o mesmo nome e características ao serem invocados, executem tarefas de maneiras diferentes. Por exemplo, um carro e um motociclo possuem as mesmas funcionalidades – como travar e acelerar independentemente do mecanismo que é utilizado (Loureiro, 2017; Trigo & Henriques, 2020).

6. PROGRAMA XD-FIRE

O XD-Fire, *Xpress Design of Concrete Sections Under Fire Loading*, é um programa de cálculo de simples e rápida utilização que permite efetuar a verificação da resistência ao fogo em elementos estruturais de betão, segundo a EN 1992-1-2 de 2020. Este software tem por base a verificação de segurança ao fogo de elementos isolados em betão armado, excluindo-se os elementos em betão pré-esforçado e as verificações de segurança de partes da estrutura e da estrutura global.

O XD-Fire apresenta dois métodos de cálculo para a verificação de segurança ao fogo de elementos de betão armado, o método de cálculo tabelado e o método de cálculo simplificado, segundo o apresentado pela EN 1992-1-2 de 2020. No método de cálculo tabelado encontram-se as verificações de segurança ao fogo dos seguintes elementos estruturais em betão armado: lajes, vigas, pilares, paredes e elementos tracionados. No método de cálculo simplificado encontram-se as verificações para os seguintes elementos estruturais de betão armado: lajes, vigas, pilares e paredes.

Neste capítulo pretende-se descrever o modo de utilização do programa XD-Fire para os diferentes métodos de cálculo, sendo apresentadas e explicadas as secções e elementos que compõem as janelas de introdução de dados e as janelas de resultados.

6.1.Janela inicial do XD-Fire

Ao iniciar o XD-Fire este apresenta uma janela inicial onde o utilizador poderá escolher o método de cálculo pretendido – “Cálculo Tabelado” ou “Cálculo Simplificado” (Figura 18).



Figura 18. Janela inicial do XD-Fire.

6.2.Barra de menus

A barra de menus (Figura 19), disposta no topo das janelas, é constituída por sete elementos: “Novo”, “Abrir”, “Guardar”, “Imprimir”, “Sair”, “Ajuda” e “Elemento em análise”.

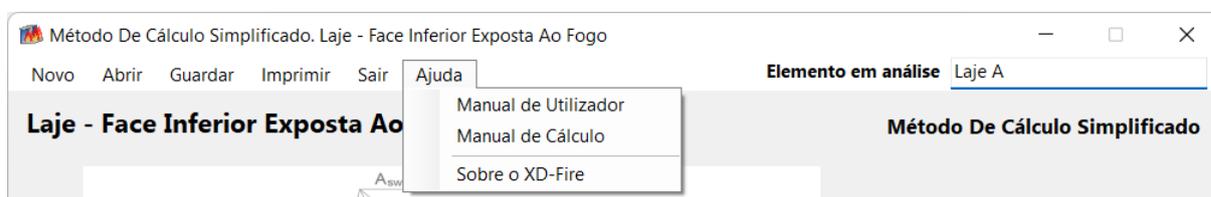


Figura 19. Barra de menus do XD-Fire.

6.2.1. Novo

Abre uma nova janela de introdução de dados da verificação previamente escolhida, não sendo guardados os valores anteriormente inseridos pelo utilizador.

6.2.2. Abrir

Permite abrir ficheiros previamente guardados com a extensão .xdf. Caso um ficheiro de uma verificação previamente guardada for aberto numa verificação diferente, este apresentará uma mensagem de erro não permitindo a abertura do mesmo.

6.2.3. Guardar

Permite guardar a verificação efetuada num ficheiro com a extensão .xdf.

6.2.4. Imprimir

Permite guardar os valores inseridos e os resultados obtidos num ficheiro com uma extensão .pdf.

6.2.5. Sair

Permite fechar e sair do programa, permitindo ainda ao utilizador guardar numa extensão .xdf a verificação que efetuou até ao momento.

6.2.6. Ajuda

É constituído por três elementos:

- “Manual de Utilizador” – é um ficheiro de extensão .pdf onde se pode encontrar uma descrição detalhada do modo de utilização do programa XD-Fire;
- “Manual de Cálculo” – é um ficheiro de extensão .pdf composto por conteúdos teóricos e exemplos práticos referentes à verificação de segurança ao fogo de elementos de betão armado (segundo a EN 1992-1-2 de 2020);
- “Sobre o XD-Fire” – uma nova janela será aberta e nela são disponibilizadas informações do programa e, em caso de dúvida, poderá contactar o responsável pelo programa através do e-mail disponibilizado (Figura 20).



Figura 20. Sobre o XD-Fire.

6.2.7. Elemento em análise

Permite definir um nome para o elemento estrutural do qual se está a efetuar a verificação de segurança.

6.3. Cálculo Tabelado

Se o método de cálculo pretendido for “Cálculo Tabelado”, uma nova janela será aberta e nela o utilizador poderá escolher uma das análises apresentadas para a verificação ao fogo do elemento estrutural pretendido (Figura 21).

Para prosseguir para o cálculo deverá clicar-se em “Calcular” o que abrirá a janela de introdução de dados correspondente à verificação de segurança ao fogo escolhida ou, caso se pretenda regressar à janela inicial deverá clicar-se em “Cancelar”.

Método De Cálculo Tabelado

Método De Cálculo Tabelado

Laje

- Maciça Simplesmente Apoiada
- Maciça Contínua
- Fungiforme
- Nervurada

Viga

- Simplesmente Apoiada
- Contínua
- Todos os lados expostos ao fogo

Pilar

- Método A
- Método B

Parede

- Compartimentação Não Resistente
- Resistente Maciça

Elementos Traccionados

- Elementos Traccionados

Cancelar Calcular

Figura 21. Janela de opções para o método de cálculo tabelado.

6.3.1. Janela de introdução de dados

A janela de introdução de dados encontra-se dividida em três seções designadas: “Materiais”, “Ações e Coeficientes” e “Geometria” (Figura 22). Será necessário introduzir a resistência ao fogo pretendida para o elemento, designada por “*REF*” ou “*R*” ou “*EP*”. Em alguns casos será necessário introduzir informações e/ou valores referentes a esforços e momentos do elemento estrutural.

Método De Cálculo Tabelaado. Parede Resistente Maciça

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise Parede resistente

Parede Resistente Maciça

Método De Cálculo Tabelaado

REI (min) 30

N_{Ed} (kN) 300

N_{Rd} (kN) 500

M_{Ed} (kN.m) 100

Materiais

Betão C20/25

Aço A500 EL

Personalizar

Ações e Coeficientes

G (kN/m) 10.00 γ_G 1.35 γ_s 1.15

Q (kN/m) 4.00 γ_Q 1.50

$\psi_{2,1}$ 0.30 γ_c 1.50

Geometria

Parede contraventada Sim

Localização da parede Intermédia

Direcção da excentricidade de 1ª ordem x

Face exposta ao fogo Uma

l (m) 3.00

b (m) 6.00

h_w (m) 0.30

l_0 (m) 3.00

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Diâm. (mm)	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0
a (m)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0	0	0	0

Voltar

Calcular

Figura 22. Exemplo de uma janela de introdução de dados para o método de cálculo tabelaado.

Estando todos os campos preenchidos, o utilizador deverá clicar em “Calcular” para avançar para a janela de resultados da verificação de segurança em análise. Caso não o pretenda, deverá clicar em “Voltar” para retroceder à janela de opções do método de cálculo tabelaado.

6.3.1.1. Materiais

Na seção de “Materiais” encontram-se apresentadas classes predefinidas para o aço e betão. As classes que se encontram predefinidas são consideradas as mais usuais, encontrando-se presentes nos eurocódigos atualmente em vigor. Caso o utilizador pretenda definir uma nova classe, este deverá escolher a opção “Personalizar” (que se encontra na lista de classe predefinidas para ambos os materiais) e clicar no botão “Personalizar”. Ao clicar no botão “Personalizar” será aberta uma janela onde o utilizador poderá atribuir uma designação, e o novo valor característico, para o material que pretende personalizar (Figura 23).

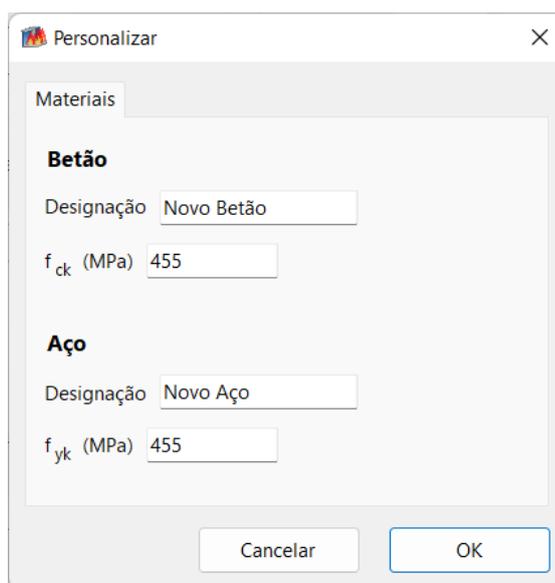


Figura 23. Janela de personalização dos materiais para o cálculo tabelado.

6.3.1.2. Ações e coeficientes

Na secção de “Ações e coeficientes” o utilizador deverá introduzir os valores referentes às ações variáveis (Q) e permanentes (G), o coeficiente parcial de segurança para as ações variáveis (γ_Q) e permanentes (γ_G), o coeficiente parcial de segurança para o aço (γ_s) e o betão (γ_c) e, por fim, o coeficiente de combinação para a combinação quase-permanente das ações variáveis ($\psi_{2,1}$) definido no anexo nacional do eurocódigo 1 parte 1-2.

6.3.1.3. Geometria

A secção “Geometria” apresenta uma ou mais imagens nas quais se encontram legendadas as dimensões necessárias ao elemento estrutural para o cálculo da verificação de segurança ao fogo (Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27).

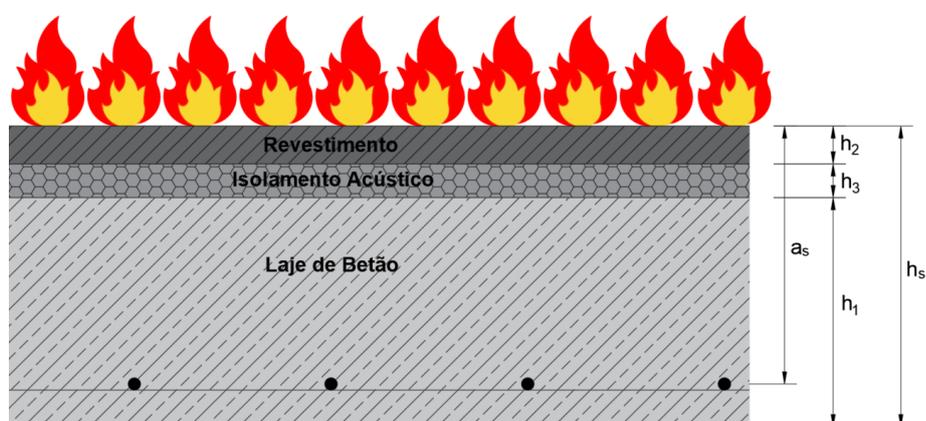


Figura 24. Ilustração das medições para uma laje exposta ao fogo na face superior.

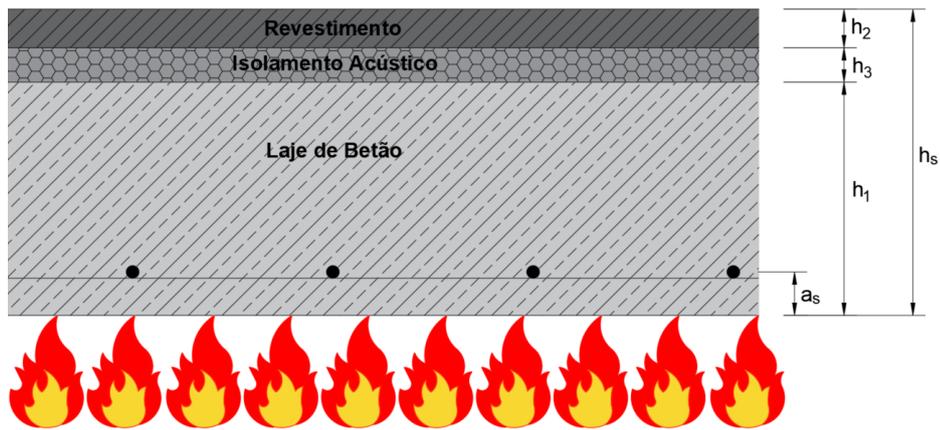


Figura 25. Ilustração das medidas para uma laje exposta ao fogo na face inferior.

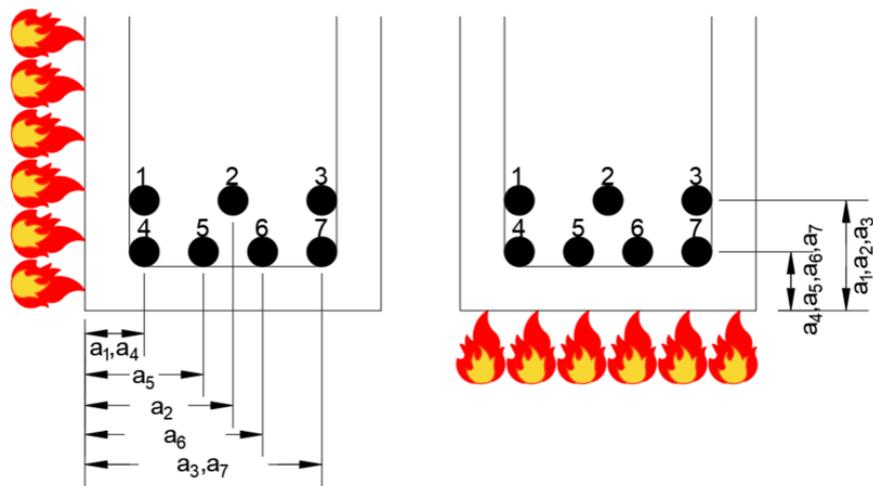


Figura 26. Ilustração da distância da armadura à face exposta ao fogo, a .

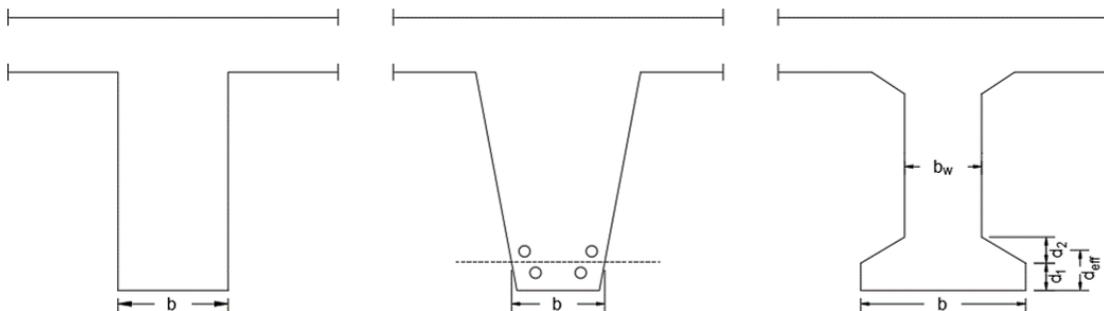


Figura 27. Ilustração das medidas para os diferentes tipos de secção transversal.

Usando a imagem apresentada como exemplo, o utilizador deverá introduzir os seus valores nos respetivos campos e seleccionar, nos campos opcionais, a opção predefinida que mais se adequa à secção transversal do seu elemento estrutural. No caso da “Laje Nervurada”, esta secção apresenta-se dividida em “Geometria - Banzo” e “Geometria - Nervura”, sendo que neste

caso, deverá ser introduzido os valores referentes à geometria do banzo e da nervura da secção transversal do elemento estrutural separadamente.

6.3.2. Janelas de resultados

A janela de resultados surgirá mal o utilizador clique em “Calcular” na janela de introdução de dados. Esta encontra-se dividida em várias secções que dependem do elemento estrutural e da análise escolhida na janela de opções para o método de calculo tabelado.



Figura 28. Exemplo de uma janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

No final o utilizador poderá clicar em “Concluir” podendo guardar a verificação que acabou de efetuar. Esta será guardada com uma extensão .xdf. Caso o utilizador escolha não guardar a verificação efetuada, esta será descartada sendo fechadas as janelas correspondentes à verificação efetuada, abrindo assim a janela inicial do programa (Figura 18).

Se o utilizador pretender poderá clicar em “Voltar” onde será aberta novamente a janela de introdução de dados com os seus dados previamente introduzidos, que poderão ser alterados e efetuado novamente o cálculo.

6.3.2.1. Orientação da armadura principal

A secção “Orientação da armadura principal” poderá apresentar um dos seguintes resultados, “Bidireccional” ou “Unidireccional” (Figura 29). Esta secção encontra-se nas

verificações de segurança ao fogo referentes ao elemento estrutural “Laje”, exceto para a laje nervurada.

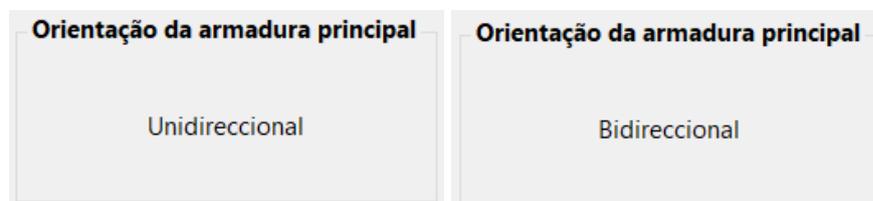


Figura 29. Resultados possíveis para a secção “Orientação da armadura principal”.

6.3.2.2. Verificação das dimensões mínimas

Nesta secção (Figura 30) as dimensões do elemento estrutural, introduzidas na secção “Geometria” da janela de introdução de dados, são apresentadas convertidas para milímetros. Segundo a EN 1992-1-2 e a resistência ao fogo, previamente introduzida na janela de introdução de dados, é apresentado o valor mínimo tabelado para as dimensões do elemento estrutural.

Tendo em conta os valores introduzidos e os valores tabelados obtidos é feita, para cada dimensão, uma verificação de segurança que tem por base averiguar se o valor introduzido pelo utilizador é maior ou menor que o valor tabelado obtido. Se o resultado desta verificação for “OK”, significará que o valor da dimensão introduzida é maior que o valor tabelado, estando assim verificada a segurança para a dimensão em análise. Caso o resultado desta verificação seja “KO”, significará que o valor da dimensão introduzida é menor que o valor tabelado, não estando assim verificada a segurança para a dimensão em análise. Para este caso é aconselhado ao utilizador que altere o valor introduzido da dimensão em causa ou que altere o valor da resistência ao fogo de maneira a poder prosseguir de forma segura com a restante verificação para o elemento estrutural.

Verificação das dimensões mínimas					
h_s (mm)	290	h_{tabelado} (mm)	150	Verificação	OK
a_s (mm)	30	a_{tabelado} (mm)	30	Verificação	KO

Figura 30. Exemplo de uma secção de “Verificação das dimensões mínimas” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.3. Tensão no aço

Nesta secção são apresentados os resultados para o fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio (η_{fi}) e a tensão do aço em situação de incêndio ($\sigma_{s,fi}$) (Figura 31).

The screenshot shows a window titled "Tensão no aço" with two input fields. The first field is labeled η_{fi} and contains the value 0.548. The second field is labeled $\sigma_{s,fi}$ (MPa) and contains the value 238.1.

Figura 31. Exemplo de uma secção de “Tensão no aço” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.4. Temperatura crítica da armadura

São apresentados nesta secção (Figura 32) os valores referentes ao parâmetro da relação tensão-extensão para o aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio a temperaturas elevadas ($k_{se,\theta}$), a temperatura crítica da armadura (θ_{cr}) e uma verificação de segurança referente à temperatura crítica da armadura.

The screenshot shows a window titled "Temperatura crítica da armadura" with three input fields. The first field is labeled $k_{se,\theta}$ and contains the value 0.48. The second field is labeled θ_{cr} (°C) and contains the value 549.5. The third field is labeled "Verificação" and contains the value "OK" in a green box.

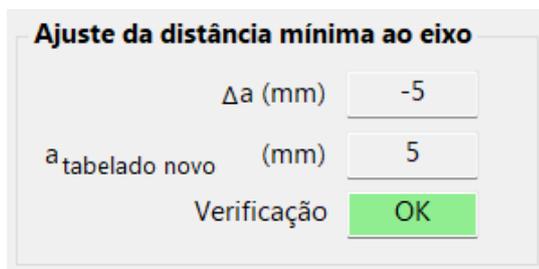
Figura 32. Exemplo de uma secção de “Temperatura crítica da armadura” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

Pretende-se, com a verificação apresentada, averiguar se a temperatura crítica obtida anteriormente se encontra entre os 350°C e os 700°C, segundo a EN 1992-1-2 de 2020. Se o resultado desta verificação for “OK” significa que a temperatura crítica obtida se encontra entre o intervalo referido, verificando-se assim a segurança. Caso o resultado desta verificação seja “KO”, a temperatura obtida não se encontra entre o intervalo referido, não se verificando, assim, a segurança.

6.3.2.5. Ajuste da distância mínima ao eixo

Nesta secção (Figura 33) são apresentados os valores correspondentes à correção associada à temperatura crítica da armadura (Δa), a nova distância mínima tabelada corrigida da armadura à face exposta ao fogo ($a_{tabelado\ novo}$) e, uma verificação que tem por base averiguar

se a nova distância mínima tabelada corrigida da armadura à face exposta ao fogo é menor que a distância da armadura à face exposta ao fogo (a) inicialmente introduzida na janela de introdução de dados.



Ajuste da distância mínima ao eixo

Δa (mm)

$a_{\text{tabelado novo}}$ (mm)

Verificação

Figura 33. Exemplo de uma secção de “Ajuste da distância mínima ao eixo” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

Consoante o resultado da verificação será apresentada uma de duas imagens onde se pretende representar se a armadura do elemento estrutural se encontra exposta ou não ao fogo.

Caso o resultado da verificação for “OK”, será apresentada a Figura 34 onde é possível visualizar que a armadura não se encontra exposta ao fogo, o que significa que a distância mínima tabelada corrigida da armadura à face exposta ao fogo é menor que a distancia da armadura à face exposta ao fogo inicialmente introduzida verificando-se, assim, que o elemento estrutural se encontra em segurança.

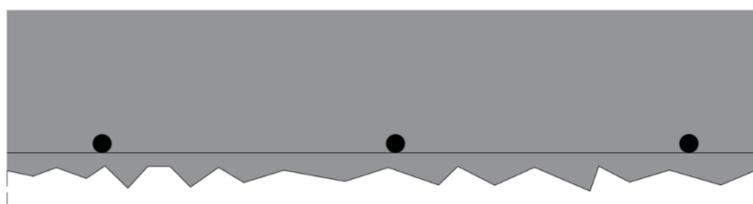


Figura 34. Armadura não exposta ao fogo.

Se o resultado da verificação for “KO”, será apresentada a Figura 35 onde é possível visualizar que a armadura se encontra exposta ao fogo, o que significa que a distância mínima tabelada corrigida da armadura à face exposta ao fogo é maior que a distância da armadura à face exposta ao fogo inicialmente introduzida, não se verificando a segurança do elemento estrutural.

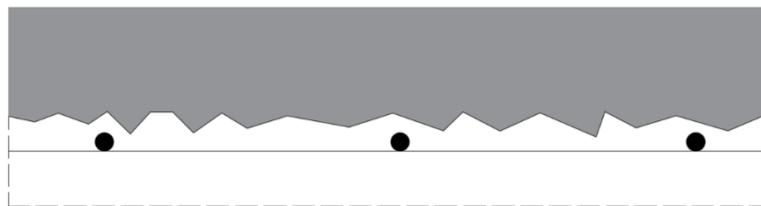


Figura 35. Armadura exposta ao fogo.

6.3.2.6. Ajuste da largura mínima

Esta secção apresenta os resultados obtidos para o aumento da largura (b_{mod}), segundo a EN 1992-1-2 de 2020, para a nova largura mínima tabelada corrigida ($b_{tabelado\ novo}$) e para uma verificação que tem por base averiguar se a nova largura mínima tabelada corrigida é menor que a largura inicialmente introduzida na janela de introdução de dados (b).

 A imagem mostra uma janela de diálogo intitulada "Ajuste da largura mínima". Ela contém três campos de entrada:

- Um campo para b_{mod} (mm) com o valor 380.
- Um campo para $b_{tabelado\ novo}$ (mm) com o valor 660.
- Um botão verde com o texto "OK" sob o rótulo "Verificação".

Figura 36. Exemplo de uma secção “Ajuste da largura mínima” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

Se esta verificação apresentar como resultado “OK”, significa que as armaduras não se encontram expostas ao fogo, sendo assim verificada a segurança ao fogo do elemento estrutural. Caso o resultado desta verificação seja “KO”, significará que as armaduras do elemento estrutural se encontram expostas ao fogo, não se verificando a segurança ao fogo do elemento estrutural.

De notar que esta secção será apenas apresentada na janela de resultados para elementos tracionados e para vigas. Esta secção só apresentará resultados se a temperatura crítica das armaduras (θ_{cr}) for inferior a 400°C, caso contrário será apenas apresentado “-”.

6.3.2.7. Verificação das condições mínimas

Nesta secção (Figura 37) são apresentados os resultados das verificações referentes às condições mínimas mencionadas pela EN 1992-1-2 de 2020. Se a condição mínima for cumprida o resultado apresentado será “OK”. Caso não seja cumprida o resultado apresentado será “KO”.

Verificação das condições mínimas

$h < b_{\min}$

$A_c > 2(b_{\min})^2$

Figura 37. Exemplo de uma secção “Verificação das condições mínimas” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.8. Forças

Encontram-se nesta secção (Figura 38) os resultados referentes ao valor de cálculo do esforço axial normal e/ou do momento fletor em situação de incêndio ($N_{Ed,fi}$ e $M_{Ed,fi}$) e do grau de utilização em situação de incêndio (μ_{fi}).

Forças

$N_{Ed,fi}$ (kN)

$M_{Ed,fi}$ (kN.m)

μ_{fi}

Figura 38. Exemplo de uma secção “Forças” da janela de resultados para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.9. Dimensões e verificação das condições mínimas

Nesta secção (Figura 39) são apresentados os resultados para algumas dimensões importantes para o cálculo, bem como verificações referentes às condições mínimas mencionadas pela EN 1992-1-2 de 2020. Se a condição mínima for cumprida o resultado apresentado será “OK”. Caso não seja cumprida o resultado apresentado será “KO”.

Dimensões e verificação das condições mínimas

$l_{0,fi}$ (m) ω_{mod} Nº mínimo de varões

Verificação $b \leq l$ $0.1 \leq \omega_{\text{mod}} \leq 1.0$ Verificação nº mínimo de varões

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Verificação $a \geq 1,50sl$	<input type="button" value="OK"/>	-	-	-	-					

Figura 39. Exemplo de uma secção “Dimensões e verificação das condições mínimas” para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.10. Cálculo da resistência ao fogo – 4 lados expostos ao fogo

Esta secção encontra-se exclusivamente para a verificação de segurança ao fogo pelo “Método A” para o elemento estrutural pilar (Figura 40). Nesta, encontra-se o valor para a resistência ao fogo (R) calculado segundo a EN 1992-1-2 de 2020, apresentando-se os resultados obtidos para os coeficientes necessários ao seu cálculo (b' , ω , n , $R_{\mu,fi}$, R_a , R_l , R_b , R_n), bem como as verificações de condições associadas ao cálculo destes coeficientes. Por fim, é apresentada uma verificação que se destina a averiguar se a resistência ao fogo (R) é menor que 240 minutos.

Cálculo da resistência ao fogo - 4 lados expostos ao fogo									
$25\text{mm} \leq a \leq 80\text{mm}$	OK	$h \leq 1.5b$	OK	$R_{\mu,fi}$	56	R_a	16	R_l	34
b' (mm)	343	ω	0.21	R_b	31	R	176	Verificação	OK
$200\text{mm} \leq b' \leq 450\text{mm}$	OK	n	6	R_n	12				

Figura 40. Exemplo de uma secção “Cálculo da resistência ao fogo - 4 lados expostos ao fogo” para o método de cálculo tabelado.

Se o resultado da verificação for “OK”, significa que a resistência ao fogo é igual ou inferior a 240 minutos. Caso o resultado desta seja “KO”, significa que a resistência ao fogo é superior a 240 minutos.

6.3.2.11. Relação entre a altura e a espessura da parede

Esta secção é exclusiva para o elemento estrutural parede para a verificação de segurança ao fogo para “Compartimentação não resistente”. Nesta, encontra-se o resultado da relação entre a altura e a espessura da parede, bem como a verificação de segurança que tem por objetivo averiguar se a esta relação é inferior a 40. Caso o resultado desta verificação seja “OK” significa que a relação entre a altura e a espessura da parede é inferior a 40, estando assim em segurança. Se o resultado desta for “KO” significa que a relação entre a altura e a espessura da parede é superior a 40, não se encontrando em segurança.

Relação entre a altura e a espessura da parede	
Relação	10
Verificação	OK

Figura 41. Exemplo de uma secção “Relação entre a altura e a espessura da parede” para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.12. Betão – propriedades térmicas

Esta (Figura 42) é uma das subsecções da secção “Extensão Reduzida”, apresentada somente para a verificação de segurança ao fogo dos elementos tracionados. Aqui encontram-se os resultados para o coeficiente de emissividade do betão (ϵ_c), para a condutividade térmica do betão (λ_c), para a densidade do betão ($\rho(\theta_c)$) e para o calor específico do betão ($c_p(\theta_c)$).

Betão - Propriedades térmicas

ϵ_c λ_c (W/m.K) $\rho(\theta_c)$ (kg/m³)

		u não especificado			
u (%)	0	u (%)	0	1.5	3.0
$c_p(\theta_c)$ (J/kg.K)	0	$c_p(\theta_c)$ (J/kg.K)	1,100	1,100	1,100

Figura 42. Exemplo de uma secção “Betão-Propriedades térmicas” para o método de cálculo tabelado.

O resultado para o calor específico do betão encontra-se dividido em duas tabelas. A tabela à esquerda apresenta o resultado do calor específico do betão para uma percentagem de teor de humidade (u) de 0% – correspondente a betão seco e betão com agregados leves secos. A tabela da direita apresenta os resultados do calor específico do betão para diferentes percentagens de teor de humidade (0%, 1.5% e 3.0%), no caso de o utilizador selecionar uma percentagem de teor de humidade não especificada na janela de introdução de dados.

6.3.2.13. Betão – propriedades mecânicas

É uma das subsecções da secção “Extensão Reduzida” (Figura 43), apresentada somente para a verificação de segurança ao fogo dos elementos tracionados. Nesta encontram-se os resultados para o coeficiente de redução da resistência à compressão do betão ($k_{c,\theta}$), extensão para a temperatura crítica ($\epsilon_{c1,\theta}$), para a extensão última correspondente à temperatura crítica ($\epsilon_{cu1,\theta}$), para o fator de configuração (ϕ), para a resistência à compressão após o arrefecimento até à temperatura ambiente ($f_{c,\theta,20^\circ C}$), para o coeficiente de redução da resistência à tração característica do betão ($k_{ct,\theta}$) e para a extensão térmica do betão à temperatura crítica ($\epsilon_{cth}(\theta)$).

Betão - Propriedades mecânicas			
$k_{c,\theta}$	0.65	$\epsilon_{c1,\theta}$	0.025
$f_{c,\theta,20^\circ\text{C}}$ (MPa)	11.7	$\epsilon_{cu1,\theta}$	0.025
		ϕ	0.59
		$k_{ct,\theta}$	0.00
		$\epsilon_{cth}(\theta)$	0.007

Figura 43. Exemplo de uma secção “Betão - Propriedades mecânicas” para o método de cálculo tabelado.

6.3.2.14. Aço – propriedades mecânicas

É outra das subsecções da secção “Extensão Reduzida” (Figura 44), apresentada somente para a verificação de segurança ao fogo dos elementos tracionados. Nesta encontram-se os resultados para os parâmetros da relação tensão-extensão para o aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio à temperatura crítica das armaduras ($k_{sy,\theta}$, $k_{sp,\theta}$, $k_{se,\theta}$, $k_{Es,\theta}$) e para a extensão térmica do aço das armaduras para betão armado à temperatura crítica das armaduras ($\epsilon_s(\theta_s)$).

Aço - Propriedades mecânicas			
$k_{sy,\theta}$	0.41	$k_{sp,\theta}$	0.15
$\epsilon_s(\theta_s)$	0.009	$k_{se,\theta}$	0.29
		$k_{Es,\theta}$	0.27

Figura 44. Exemplo de uma secção “Aço -Propriedades mecânicas” para o método de cálculo tabelado.

6.4. Cálculo Simplificado

Se o método de cálculo pretendido for “Cálculo Simplificado” uma nova janela será aberta, na qual o utilizador poderá escolher uma das análises apresentadas para a verificação ao fogo do elemento estrutural pretendido (Figura 45).

Para prosseguir para o cálculo deverá clicar em “Calcular” o que abrirá a janela de introdução de dados correspondente à verificação de segurança ao fogo escolhida ou, caso não o pretenda e queira voltar à janela inicial, deverá clicar em “Cancelar”.

Método De Cálculo Simplificado

Método De Cálculo Simplificado

Laje

- Face Inferior Exposta Ao Fogo
- Face Superior Exposta Ao Fogo
- Face Inferior E Superior Expostas Ao Fogo

Viga

- Duas Faces Expostas Ao Fogo
- Três Faces Expostas Ao Fogo
- Quatro Faces Expostas Ao Fogo

Pilar

- Quatro Faces Expostas Ao Fogo

Parede

- Duas Faces Expostas Ao Fogo

Cancelar Calcular

Figura 45. Janela de opções para o método de cálculo simplificado.

6.4.1. Janela de introdução de dados

A janela de introdução de dados encontra-se dividida em quatro seções, nomeadamente, “Materiais”, “Geometria da secção”, “Armadura” (por vezes, esta secção poderá aparecer dividida em “Armadura superior” e “Armadura inferior”) e “Ações e Coeficientes” (Figura 46). Será ainda necessário introduzir a resistência ao fogo pretendida para o elemento, designada por “*REI*” ou “*R*”, o tipo de agregado do betão, o tipo de aço e o respetivo momento e esforço axial à temperatura ambiente (M_{Ed} e N_{Ed}).

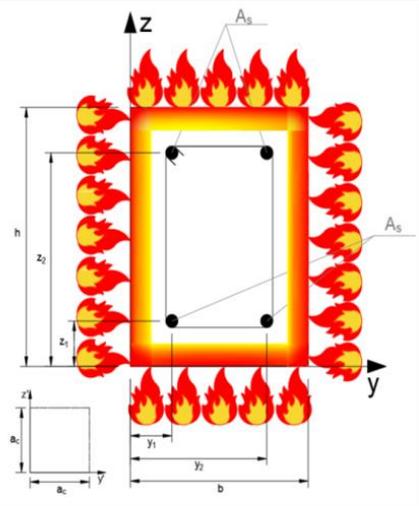
Para cada tipo de análise será apresentada uma imagem que corresponde ao elemento estrutural para o qual se pretende efetuar a verificação ao fogo. Usando a imagem como referência, o utilizador deverá preencher os seus valores nos respetivos campos.

Método De Cálculo Simplificado. Pilar - Quatro Faces Exposta Ao Fogo

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise: Pilar A

Pilar - Quatro Faces Expostas Ao Fogo Método De Cálculo Simplificado



M_{Ed} (kN.m) 37.40
 N_{Ed} (kN) 600.00
 R (min) 90
 Tipo de Incêndio: Padrão

Materiais
 Betão C25/30
 Aço A500 ER
 Personalizar

Tipo de agregados Siliciosos
 Tipo de aço Laminado a quente

Armadura
 Número de Varões 4 a_c (m) 0.10 E_s (MPa) 200000

Varão	Diâm. (mm)	y_i (m)	z_i (m)	Varão de Canto Exposto ao fogo	y' (m)	z' (m)
V1	10	0.03	0.03	Sim	0.02	0.02
V2	10	0.27	0.03	Sim	0.02	0.02
V3	10	0.03	0.47	Sim	0.02	0.02
V4	10	0.27	0.47	Sim	0.02	0.02
V5	10	0.03	0.07	Não	0.02	0.02
V6	10	0.27	0.07	Não	0.02	0.02
V7	10	0.03	0.47	Não	0.02	0.02
V8	10	0.27	0.47	Não	0.02	0.02
V9	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V10	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V11	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V12	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V13	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V14	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V15	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V16	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V17	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V18	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V19	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V20	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02

Ações e coeficientes
 G (kN/m) 15.00 γ_G 1.35 γ_s 1.15
 Q (kN/m) 8.00 γ_Q 1.50
 $\psi_{2.1}$ 0.30 γ_c 1.50

Geometria da secção
 h (m) 0.50
 b (m) 0.30
 c_{mec} (m) 0.03
 l (m) 4.00

Voltar Calcular

Figura 46. Exemplo de uma janela de introdução de dados para o método de cálculo simplificado.

Estando todos os campos preenchidos, o utilizador deverá clicar em “Calcular” para avançar para a janela de resultados da verificação de segurança em análise. Caso não o pretenda, deverá clicar em “Voltar” para retroceder para a janela de opções do método de cálculo tabelado.

6.4.1.1. Materiais

Na secção de “Materiais” encontram-se apresentadas classes predefinidas para o aço e betão. As classes que se encontram predefinidas são consideradas as mais usuais e que se encontram presentes nos eurocódigos atualmente em vigor. Caso o utilizador pretenda definir uma nova classe, este deverá escolher a opção “Personalizar” (que se encontra na lista de classe predefinidas para ambos os materiais) e clicar no botão “Personalizar”. Ao clicar no botão “Personalizar” será aberta uma janela onde o utilizador poderá atribuir uma designação e o novo valor característico para o material que pretende personalizar (Figura 47).

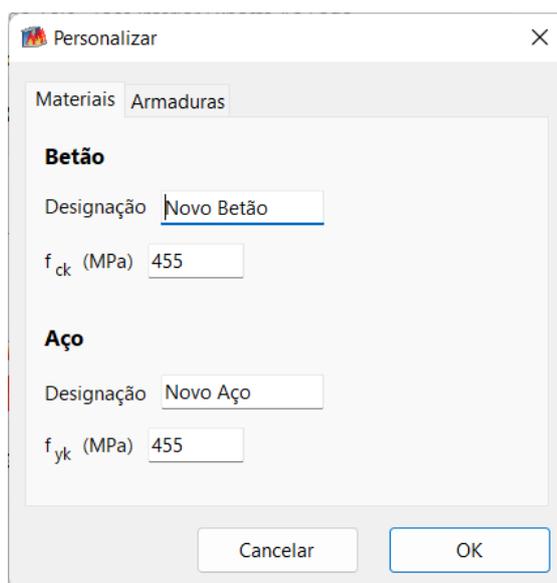


Figura 47. Janela de personalização dos materiais para o método de cálculo simplificado.

6.4.1.2. Geometria da secção

Nesta secção o utilizador deverá introduzir os seus valores referentes às dimensões do elemento estrutural em análise e, em caso de dúvida deverá utilizar a imagem apresentada como referência.

As dimensões do elemento estrutural por norma pedidas nesta secção são altura (h), vão (para lajes), largura (b), comprimento (l) e recobrimento mecânico (c_{mec}).

6.4.1.3. Armadura

Na secção “Armadura”, para o elemento estrutural laje, encontram-se apresentados diâmetros e espaçamentos predefinidos. Os diâmetros e espaçamento que se encontram predefinidos são considerados os mais usuais. Caso o utilizador pretenda definir um novo diâmetro e espaçamento, deverá escolher a opção “Personalizar” (que se encontra na lista de diâmetros e espaçamentos predefinidos) e clicar no botão “Personalizar”. Ao clicar no botão “Personalizar” será aberta uma janela onde o utilizador poderá atribuir um novo diâmetro e um novo espaçamento (Figura 48).

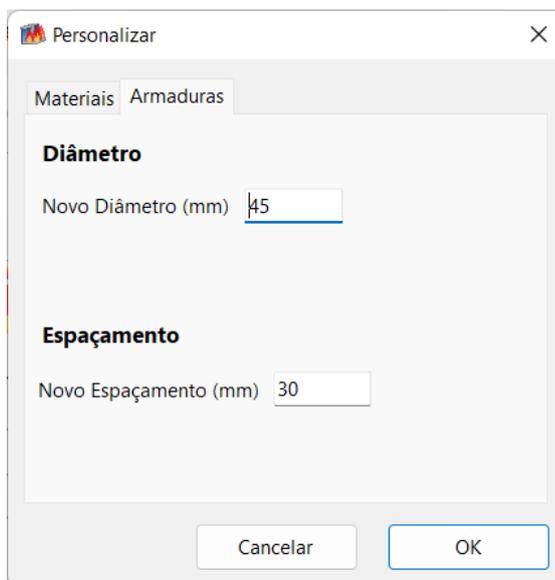


Figura 48. Janela de personalização das armaduras para o método de cálculo simplificado.

Para análise “Duas Faces Expostas Ao Fogo” para o elemento estrutural viga, é dividida em duas opções: “Armadura Superior” e “Armadura Inferior” (Figura 49). O utilizador deverá escolher de entre as opções apresentadas e o número de camadas de varões que pretende de 1 a 3. Deverá, ainda, introduzir o diâmetro do varão correspondente a cada camada seleccionada, a altura a que se encontra o varão (h_{vi}) utilizando como referência a imagem apresentada e, o número de varões existentes em cada camada.

Armadura Superior			
Nº de camadas de varões		1	
Diâmetro camada 1 (mm)	h_{v1} (m)	Nº de varões	
20	0.03	2	
Diâmetro camada 2 (mm)	h_{v2} (m)	Nº de varões	
20	0.06	2	
Diâmetro camada 3 (mm)	h_{v3} (m)	Nº de varões	
20	0.09	2	
Armadura Inferior			
Nº de camadas de varões		2	
Diâmetro camada 1 (mm)	h_{v4} (m)	Nº de varões	
20	0.44	2	
Diâmetro camada 2 (mm)	h_{v5} (m)	Nº de varões	
20	0.47	4	
Diâmetro camada 3 (mm)	h_{v6} (m)	Nº de varões	
20	0.50	4	

Figura 49. Exemplo das secções “Armadura Superior” e “Armadura Inferior” referente à análise a duas faces expostas ao fogo de uma viga para o método de cálculo simplificado.

Para as restantes análises, nesta secção (Figura 50), o utilizador deverá escolher o número de varões que pretende entre 1 e 20, o módulo de elasticidade do aço (E_s) e terá de preencher a tabela apresentada. Esta tabela encontra-se dividida em:

- Varão – numerados de 1 a 20 (V1 a V20);
- Diâmetro – correspondente ao diâmetro de cada varão independentemente da camada em que se encontra;
- y_i – distância do eixo da secção transversal ao centro do varão na horizontal;
- z_i – distância do eixo da secção transversal ao centro do varão na vertical;
- Varão de canto exposto ao fogo – deverá escolher entre “Sim” e “Não”;
- y' – distância no eixo horizontal dos cantos com varões expostos ao fogo em dois lados, esta varia entre 0 e a_c .
- z' – distância no eixo vertical dos cantos com varões expostos ao fogo em dois lados, esta varia entre 0 e a_c .

O valor da dimensão da zona de canto afetada pela transferência de calor bilateral (a_c) será automaticamente definido pelo programa.

Os valores de y' e z' só serão necessários caso existam varões de canto. Caso não existam varões de canto os campos para introdução destes valores encontrar-se-ão bloqueados.

Armadura

Número de Varões a_c (m) E_s (MPa)

Varão	Diâm. (mm)	y_i (m)	z_i (m)	Varão de Canto Exposto ao fogo	y' (m)	z' (m)
V1	10	0.03	0.03	Sim	0.02	0.02
V2	10	0.27	0.03	Sim	0.02	0.02
V3	10	0.03	0.47	Sim	0.02	0.02
V4	10	0.27	0.47	Sim	0.02	0.02
V5	10	0.03	0.07	Não	0.02	0.02
V6	10	0.27	0.07	Não	0.02	0.02
V7	10	0.03	0.47	Não	0.02	0.02
V8	10	0.27	0.47	Não	0.02	0.02
V9	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V10	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V11	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V12	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V13	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V14	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V15	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V16	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V17	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V18	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V19	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V20	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02

Figura 50. Exemplo da secção “Armadura” para o método de cálculo simplificado.

6.4.1.4. Ações e coeficientes

Na secção de “Ações e coeficientes” o utilizador terá que introduzir os valores referentes às ações variáveis (Q) e permanentes (G), o coeficiente parcial de segurança para as ações variáveis (γ_Q) e permanentes (γ_G), o coeficiente parcial de segurança para o aço (γ_s) e o betão (γ_c) e, por fim, o coeficiente de combinação para a combinação quase-permanente das ações variáveis ($\psi_{2,1}$) definido no anexo nacional do eurocódigo 1 parte 1-2.

6.4.2. Janelas de resultados

A janela de resultados surgirá mal o utilizador clique em “Calcular” na janela de introdução de dados. Esta encontra-se dividida em várias secções que dependem do elemento estrutural e da análise escolhida pelo método de calculo simplificado.

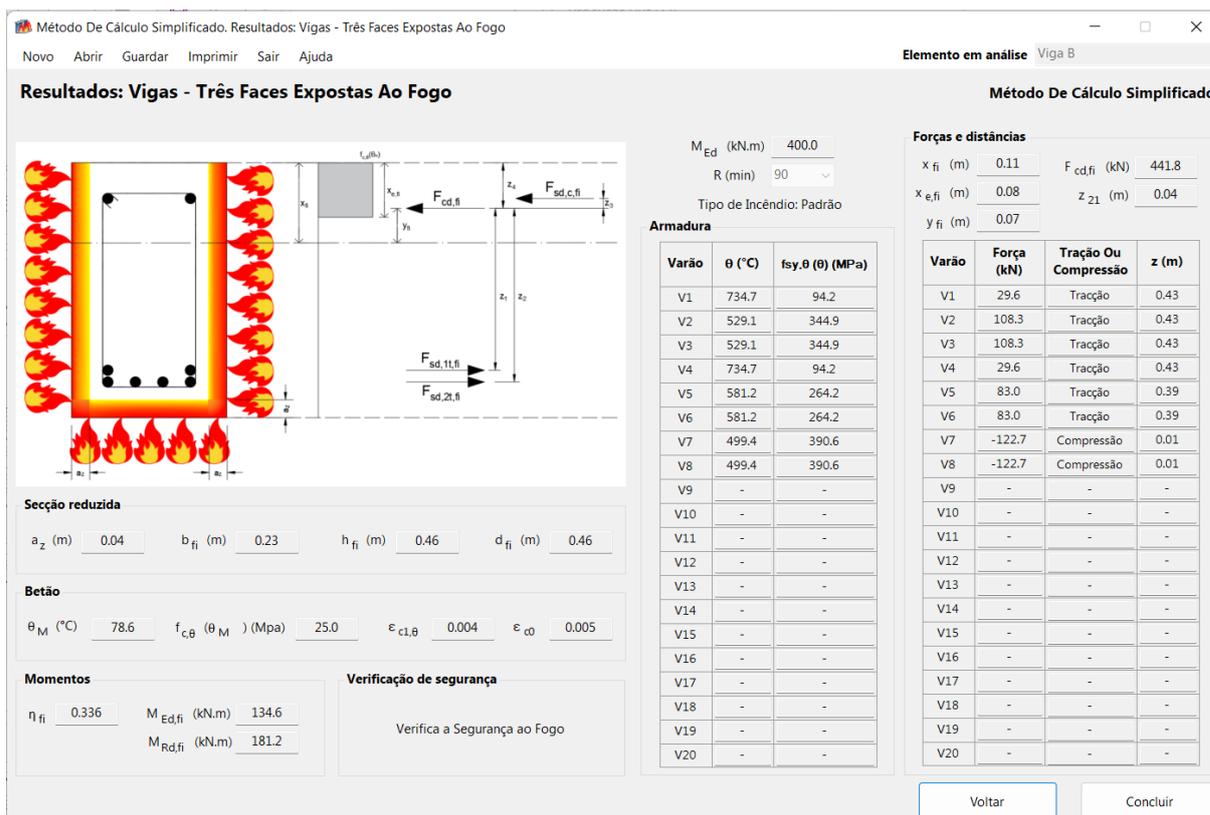


Figura 51. Exemplo de uma janela de resultados para o método de cálculo simplificado.

No final o utilizador poderá clicar em “Concluir” onde poderá guardar a verificação que acabou de efetuar. Esta será guardada com uma extensão .xdf. Caso o utilizador escolha não guardar a verificação efetuada, esta será descartada e serão fechadas as janelas correspondentes à verificação efetuada abrindo-se, de seguida, a janela inicial do programa (Figura 18).

Se o utilizador pretender, poderá clicar em “Voltar” e será aberta, novamente, a janela de introdução de dados com os seus dados previamente introduzidos (que poderão ser alterados e efetuado novamente o cálculo caso o utilizador o pretenda).

6.4.2.1. Secção reduzida

Nesta secção (Figura 52) encontram-se apresentados os resultados obtidos para a espessura da zona afetada pelo fogo (a_z), para a largura reduzida da secção transversal afetada pelo fogo (b_{fi}), para a altura efetiva da secção reduzida (d_{fi}) e para a altura reduzida da secção transversal afetada pelo fogo (h_{fi}).

Secção reduzida	
a_z (m)	0.04
h_{fi} (m)	0.43
b_{fi} (m)	0.30
d_{fi} (m)	0.43

Figura 52. Exemplo de uma secção “Secção reduzida” para o método de cálculo simplificado.

6.4.2.2. Betão

Encontram-se nesta secção (Figura 53) os resultados para: temperatura no centro de massa da secção transversal (θ_M), tensão máxima de compressão do betão para a temperatura no centro de massa da secção transversal ($f_{c,\theta}(\theta_M)$), extensão para a temperatura no centro de massa da secção transversal ($\epsilon_{c1,\theta}$) e a extensão no betão no lado mais comprimido da secção transversal (ϵ_{c0}).

Betão							
θ_M (°C)	81.1	$f_{c,\theta}(\theta_M)$ (Mpa)	25.0	$\epsilon_{c1,\theta}$	0.004	ϵ_{c0}	0.005

Figura 53. Exemplo de uma secção “Betão” para o método de cálculo simplificado.

6.4.2.3. Armadura

Nesta secção (Figura 54) são apresentados os resultados referentes à armadura da secção transversal do elemento estrutural em análise, nomeadamente, a temperatura de cada varão (θ) em situação de incêndio e a tensão de cedência à tração referente à temperatura de cada varão ($f_{sy,\theta}(\theta)$).

Armadura		
Varão	θ (°C)	$f_{sy,\theta}$ (MPa)
V1	734.7	94.2
V2	529.1	344.9
V3	529.1	344.9
V4	734.7	94.2
V5	581.2	264.2
V6	581.2	264.2
V7	499.4	390.6
V8	499.4	390.6
V9	-	-
V10	-	-
V11	-	-
V12	-	-
V13	-	-
V14	-	-
V15	-	-
V16	-	-
V17	-	-
V18	-	-
V19	-	-
V20	-	-

Figura 54. Exemplo de uma secção “Armadura” para o método de cálculo simplificado.

Para as análises referentes aos elementos estruturais pilar e parede, esta secção (Figura 55) apresenta os resultados para a temperatura de cada varão (θ_i) em situação de incêndio, tensão de cedência à tração referente à temperatura de cada varão ($f_{sy,\theta}(\theta)$), módulo de elasticidade do aço referente à temperatura de cada varão em situação de incêndio ($E_{s,\theta}(\theta)$), tensão equivalente de cada varão para valores de extensão superiores a $\epsilon_{sp,\theta}$ e inferiores a $\epsilon_{sy,\theta}$ ($f_{se,\theta}$), e a extensão térmica do aço de cada varão ($\epsilon_s(\theta_s)$).

Armadura					
Varão	θ (°C)	$f_{sy,\theta}$ (MPa)	E_s,θ (MPa)	$f_{se,\theta}$ (MPa)	ϵ_s (Bs) (MPa)
V1	750.9	84.5	21,930	44.9	0.0
V2	750.9	84.5	21,930	44.9	0.0
V3	750.9	84.5	21,930	44.9	0.0
V4	750.9	84.5	21,930	44.9	0.0
V5	-	-	-	-	-
V6	-	-	-	-	-
V7	-	-	-	-	-
V8	-	-	-	-	-
V9	-	-	-	-	-
V10	-	-	-	-	-
V11	-	-	-	-	-
V12	-	-	-	-	-
V13	-	-	-	-	-
V14	-	-	-	-	-
V15	-	-	-	-	-
V16	-	-	-	-	-
V17	-	-	-	-	-
V18	-	-	-	-	-
V19	-	-	-	-	-
V20	-	-	-	-	-

Figura 55. Exemplo de uma secção “Armadura” para a análise referente ao elemento estrutural pilar e ao elemento estrutural parede pelo método de cálculo simplificado

6.4.2.4. Armadura superior

Nesta secção (Figura 56) são apresentados os resultados referentes à armadura superior da secção transversal do elemento estrutural em análise, nomeadamente, a temperatura de cada varão pertencente à armadura superior (θ_i) e a tensão de cedência à tração referente à temperatura de cada varão pertencente à armadura superior ($f_{sy,\theta}(\theta_i)$).

Armadura Superior	
θ_1 (°C)	487.4
$f_{sy,\theta1}$ (θ) (Mpa)	352.0
θ_2 (°C)	0.0
$f_{sy,\theta2}$ (θ) (Mpa)	0.0
θ_3 (°C)	0.0
$f_{sy,\theta3}$ (θ) (Mpa)	0.0

Figura 56. Exemplo de uma secção “Armadura Superior” para o método de cálculo simplificado.

6.4.2.5. Armadura inferior

Nesta secção (Figura 57) são apresentados os resultados referentes à armadura inferior da secção transversal do elemento estrutural em análise – neste caso, a temperatura de cada varão pertencente à armadura inferior (θ_i) e a tensão de cedência à tração referente à temperatura de cada varão pertencente à armadura inferior ($f_{sy,\theta}(\theta_i)$).

Armadura Inferior	
θ_1 (°C)	251.3
$f_{sy,\theta1}$ (θ) (Mpa)	500.0
θ_2 (°C)	487.4
$f_{sy,\theta2}$ (θ) (Mpa)	352.0
θ_3 (°C)	0.0
$f_{sy,\theta3}$ (θ) (Mpa)	0.0

Figura 57. Exemplo de uma secção “Armadura Inferior” para o método de cálculo simplificado.

6.4.2.6. Forças e distâncias

Sendo esta uma secção composta por diversos resultados para as forças e distâncias, esta variará consoante o elemento estrutural e a análise pretendida. Para cada análise e elemento estrutural é apresentada uma imagem legendada de referência/exemplo, onde se encontram as principais forças e distâncias representadas.

Para o elemento estrutural laje, serão apresentados (Figura 58) os resultados para:

- profundidade reduzida do betão em compressão em situação de incêndio (x_{fi});

- profundidade efetiva do betão em compressão em situação de incêndio ($x_{e,fi}$);
- distância do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio (y_{fi});
- valor de cálculo da força de compressão no betão em situação de incêndio na direção do eixo longitudinal do elemento ($F_{cd,fi}$);
- distância entre a força de compressão do betão e a força de tração resistente da armadura (z_1);
- força de tração resistente da armadura longitudinal no lado tracionado ($F_{sd,t,fi}$);
- distância entre a superfície comprimida da seção e a força de compressão do betão (z_2).

Forças e distâncias			
x_{fi} (m)	0.03	$F_{sd,t,fi}$ (kN)	649.7
$x_{e,fi}$ (m)	0.02	z_1 (m)	0.26
y_{fi} (m)	0.02	$F_{cd,fi}$ (kN)	649.7
		z_2 (m)	0.01

Figura 58. Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural laje pelo método de cálculo simplificado.

Para o elemento estrutural viga, nomeadamente para as vigas com duas faces expostas ao fogo, serão apresentados (Figura 59) os seguintes resultados para:

- profundidade reduzida do betão em compressão em situação de incêndio (x_{fi});
- profundidade efetiva do betão em compressão em situação de incêndio ($x_{e,fi}$);
- distancia do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio (y_{fi});
- valor de cálculo da força de compressão no betão em situação de incêndio na direção do eixo longitudinal do elemento ($F_{cd,fi}$);
- distância entre a superfície comprimida da seção e a força de compressão do betão (z_1).
- força de compressão resistente da armadura longitudinal no lado menos comprimido para os varões pertencentes à camada 1 da armadura superior ($F_{sd,1c,fi}$);

- distância entre a força de compressão do betão e a força de compressão resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 1 da armadura superior (z_6);
- força de compressão resistente da armadura longitudinal no lado menos comprimido para os varões pertencentes à camada 2 da armadura superior ($F_{sd,2c,fi}$);
- distância entre a força de compressão do betão e a força de compressão resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 2 da armadura superior (z_5);
- força de compressão resistente da armadura longitudinal no lado menos comprimido para os varões pertencentes à camada 3 da armadura superior ($F_{sd,3c,fi}$);
- distância entre a força de compressão do betão e a força de compressão resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 3 da armadura superior (z_4);
- força de tração resistente da armadura longitudinal no lado tracionado para os varões pertencentes à camada 3 da armadura inferior ($F_{sd,3t,fi}$);
- distância entre a força de tração resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 3 da armadura inferior e a força de compressão do betão (z_3);
- força de tração resistente da armadura longitudinal no lado tracionado para os varões pertencentes à camada 2 da armadura inferior ($F_{sd,2t,fi}$);
- distância entre a força de tração resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 2 da armadura inferior e a força de compressão do betão (z_2);
- força de tração resistente da armadura longitudinal no lado tracionado para os varões pertencentes à camada 1 da armadura inferior ($F_{sd,1t,fi}$);
- distância entre a força de tração resistente da armadura nos varões pertencentes à camada 1 da armadura inferior e a força de compressão do betão (z_1).

x_{fi} (m)	0.14	$F_{sd,3c,fi}$ (kN)	0.0
$x_{e,fi}$ (m)	0.10	z_4 (m)	0.00
y_{fi} (m)	0.09	$F_{sd,3t,fi}$ (kN)	0.0
$F_{cd,fi}$ (kN)	756.5	z_3 (m)	0.00
z_7 (m)	0.06	$F_{sd,2t,fi}$ (kN)	442.3
$F_{sd,1c,fi}$ (kN)	0.0	z_2 (m)	0.38
z_6 (m)	0.06	$F_{sd,1t,fi}$ (kN)	314.2
$F_{sd,2c,fi}$ (kN)	0.0	z_1 (m)	0.35
z_5 (m)	0.00		

Figura 59. Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural viga referente à análise de “Duas faces expostas ao fogo” pelo método de cálculo simplificado.

Para o elemento estrutural viga, referente à análise a três faces expostas ao fogo e a quatro faces expostas ao fogo serão apresentadas (Figura 60) os seguintes resultados:

- profundidade reduzida do betão em compressão em situação de incêndio (x_{fi});
- profundidade efetiva do betão em compressão em situação de incêndio ($x_{e,fi}$);
- distancia do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio (y_{fi});
- valor de cálculo da força de compressão no betão em situação de incêndio na direção do eixo longitudinal do elemento ($F_{cd,fi}$);
- distância entre a superfície comprimida da seção e a força de compressão do betão (z_1).

Nesta secção é ainda possível encontrar uma tabela onde apresentam resultados referentes:

- à força em cada varão, para o número de varões inseridos pelo utilizador, compreendido entre 1 e 20;
- à tração ou compressão. De forma a designar se a força apresentada anteriormente é de tração ou de compressão resistente da armadura;
- à distância para cada varão (z_i) referente a cada força. Se a força for de tração, esta distância será a diferença entre a força de tração resistente do respetivo varão e a força de compressão do betão. Se a força for de compressão, esta distância será a

diferença entre a força de compressão do betão e a força de compressão resistente do respetivo varão.

Forças e distâncias

x_{fi} (m)	0.11	$F_{cd,fi}$ (kN)	441.8
$x_{e,fi}$ (m)	0.08	z_{21} (m)	0.04
y_{fi} (m)	0.07		

Varão	Força (kN)	Tração Ou Compressão	z (m)
V1	29.6	Tracção	0.43
V2	108.3	Tracção	0.43
V3	108.3	Tracção	0.43
V4	29.6	Tracção	0.43
V5	83.0	Tracção	0.39
V6	83.0	Tracção	0.39
V7	-122.7	Compressão	0.01
V8	-122.7	Compressão	0.01
V9	-	-	-
V10	-	-	-
V11	-	-	-
V12	-	-	-
V13	-	-	-
V14	-	-	-
V15	-	-	-
V16	-	-	-
V17	-	-	-
V18	-	-	-
V19	-	-	-
V20	-	-	-

Figura 60. Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural viga referente às análises de “Três faces expostas ao fogo” e “Quatro faces expostas ao fogo” pelo método de cálculo simplificado.

Para os elementos estruturais pilar e parede (Figura 61 e Figura 62) esta secção apresenta os resultados referentes:

- à profundidade reduzida do betão em compressão em situação de incêndio (x_{fi});
- à profundidade efetiva do betão em compressão em situação de incêndio ($x_{e,fi}$);
- à distância do centro de massa da zona comprimida do betão ao eixo neutro em situação de incêndio (y_{fi});

- ao valor de cálculo da força de compressão no betão em situação de incêndio na direção do eixo longitudinal do elemento ($F_{cd,fi}$);
- à distância a força de compressão do betão e o centro de massa da secção transversal do elemento estrutural (z_{21} para o elemento estrutural pilar ou y_{21} para o elemento estrutural parede);
- à força de compressão resistente da armadura longitudinal no lado mais comprimida ($F_{sd,0,fi}$);
- à distância a força de compressão resistente da armadura e o centro de massa da secção transversal do elemento estrutural (z_{22} para o elemento estrutural pilar ou y_{22} para o elemento estrutural parede);
- ao valor de cálculo do esforço axial normal em situação de incêndio ($N_{Ed,fi}$);
- à excentricidade máxima (e_d) que corresponde à distância entre o esforço axial normal em situação de incêndio e o centro de massa da secção transversal do elemento estrutural.

Nesta secção é ainda possível encontrar uma tabela onde apresenta resultados relativos:

- à força em cada varão, para o número de varões inseridos pelo utilizador, compreendido entre 1 e 20;
- à tração ou compressão. De forma a designar se a força apresentada anteriormente é de tração ou de compressão resistente da armadura;
- à distância para cada varão (z_i para o elemento estrutural pilar ou y_i para o elemento estrutural parede) referente a cada força. Se a força for de tração, esta distância será a diferença entre a força de tração resistente do respetivo varão e o centro de massa da secção transversal do elemento estrutural. Se a força for de compressão, esta distância será a diferença entre a força de compressão do betão e o centro de massa da secção transversal do elemento estrutural.

Forças e distâncias			
x_{fi} (m)	0.05	$F_{sd,0,fi}$ (kN)	83.6
$x_{e,fi}$ (m)	0.04	z_{22} (m)	0.22
y_{fi} (m)	0.03	$N_{Ed,fi}$ (kN)	323.7
$F_{cd,fi}$ (kN)	240.1	e_d (m)	-0.06
z_{21} (m)	0.19		

Varão	Força (kN)	Tração Ou Compressão	z (m)
V1	3.5	Tracção	0.22
V2	3.5	Tracção	0.22
V3	0.0	Compressão	0.22
V4	0.0	Compressão	0.22
V5	-	-	-
V6	-	-	-
V7	-	-	-
V8	-	-	-
V9	-	-	-
V10	-	-	-
V11	-	-	-
V12	-	-	-
V13	-	-	-
V14	-	-	-
V15	-	-	-
V16	-	-	-
V17	-	-	-
V18	-	-	-
V19	-	-	-
V20	-	-	-

Figura 61. Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural pilar pelo método de cálculo simplificado.

Forças e distâncias			
x_{fi} (m)	0.05	$F_{sd,0,fi}$ (kN)	38.2
$x_{e,fi}$ (m)	0.04	y_{22} (m)	0.17
y_{fi} (m)	0.03	$N_{Ed,fi}$ (kN)	377.7
$F_{cd,fi}$ (kN)	339.5	e_d (m)	-0.14
y_{21} (m)	0.15		

Varão	Força (kN)	Tração Ou Compressão	y (m)
V1	99.1	Tracção	0.17
V2	0.0	Compressão	0.17
V3	99.1	Tracção	0.17
V4	0.0	Compressão	0.17
V5	-	-	-
V6	-	-	-
V7	-	-	-
V8	-	-	-
V9	-	-	-
V10	-	-	-
V11	-	-	-
V12	-	-	-
V13	-	-	-
V14	-	-	-
V15	-	-	-
V16	-	-	-
V17	-	-	-
V18	-	-	-
V19	-	-	-
V20	-	-	-

Figura 62. Exemplo de uma secção “Forças e distâncias” para o elemento estrutural parede pelo método de cálculo simplificado.

6.4.2.7. Momentos

Esta secção (Figura 63) apresenta os resultados para o fator de redução para o nível de carregamento em situação de incêndio (η_{fi}), para o valor de cálculo do momento fletor em situação de incêndio ($M_{Ed,fi}$) e para o momento fletor resistente em situação de incêndio ($M_{Rd,fi}$).

Momentos	
η_{fi}	0.540
$M_{Ed,fi}$ (kN.m)	54.0
$M_{Rd,fi}$ (kN.m)	87.7

Figura 63. Exemplo de uma secção “Momentos” para o método de cálculo simplificado.

6.4.2.8. Verificação de segurança

Nesta secção é apresentado o resultado da última verificação de segurança do elemento estrutural ao fogo. Poderão ser apresentados dois dos seguintes resultados: “Verifica a Segurança ao Fogo” (Figura 64) ou “Não Verifica a Segurança ao Fogo” (Figura 65).

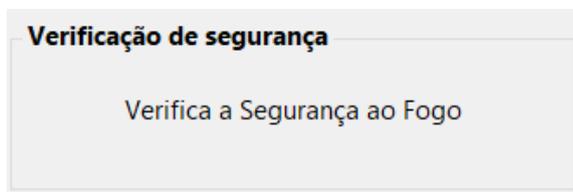


Figura 64. Exemplo de uma secção “Verificação de segurança” com resultado afirmativo para o método de cálculo simplificado.

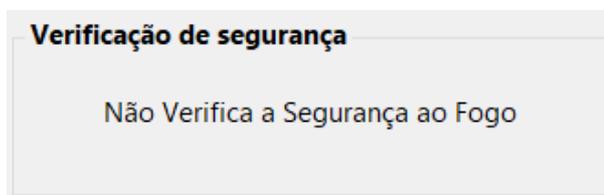


Figura 65. Exemplo de uma secção “Verificação de segurança” com resultado negativo para o método de cálculo simplificado.

6.5. Convenção de eixos e sinais

O XD-Fire utiliza a convenção de eixos e de sinais que se encontra nas imagens presentes em cada janela de introdução de dados e de resultados para cada método de cálculo escolhido. Se o resultado obtido para uma força for positivo, dever-se-á assumir que a sua direção é igual à que se encontra representada na imagem fornecida. Caso o resultado seja negativo, dever-se-á assumir que a direção desta é contrária à apresentada na imagem fornecida.

No caso das distâncias inseridas na janela de introdução de dados, estas deverão seguir a direção do eixo que se encontra representado na imagem fornecida. Já na janela de resultados, estas serão consideradas positivas no sentido de cima para baixo como representado na imagem fornecida.

7. EXEMPLOS PRÁTICOS

Neste capítulo encontram-se resolvidos, com recurso ao XD-Fire, alguns exemplos práticos para situações hipotéticas de elementos estruturais expostos ao fogo.

7.1.Exemplo 1 – Verificação da resistência ao fogo de uma laje

Pretende verificar-se se uma laje simplesmente apoiada exposta ao fogo, na sua face inferior, se encontra em segurança para uma resistência ao fogo de 90 minutos.

Esta laje, representada na Figura 66, apresenta uma dimensão de 4,7m x 4,7m, composta por uma laje de betão (espessura 0,21m), uma camada de isolamento acústico (espessura 0,05) e, uma camada de revestimento (espessura 0,03m).

Devem ser consideradas as seguintes cargas uniformemente distribuídas: permanente de 11,25 kN/m e variáveis de 4,00 kN/m.

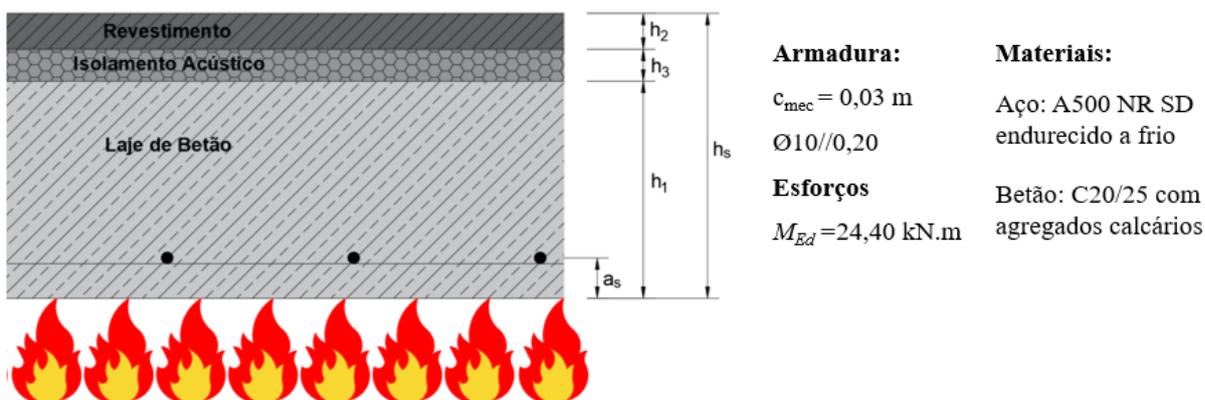


Figura 66. Representação de uma laje exposta ao fogo numa face em corte.

7.1.1. Método de cálculo tabelado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $h_1 = 0,21 \text{ m}$;
- $h_2 = 0,03 \text{ m}$;
- $h_3 = 0,05 \text{ m}$;
- $a_s = c_{mec} = 0,03 \text{ m}$;
- vão maior = 4,70 m;

- vão menor = 4,70 m;
- $REI = 90$ min.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço, em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016), coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo tabelado “Laje Maciça Simplesmente Apoiada”, como demonstrado na Figura 67.

Figura 67. Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 1).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá mostrar uma janela com os resultados, como demonstrado na Figura 68.

Interpretando os resultados obtidos, esta laje possui uma altura (h_s) e uma distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo (a_s) superiores ao valor mínimo tabelado; a sua temperatura crítica (θ_{cr}) encontra-se dentro do intervalo estipulado pela EN 1992-1-2 de 2020;

e a nova distância do eixo das armaduras à face exposta ao fogo ($a_{\text{tabelado novo}}$) é inferior ao valor da distância ao eixo das armaduras à face exposta (a_s) introduzido anteriormente.

Como todas as verificações apresentadas no XD-Fire para a laje em estudo são iguais a “OK”, é possível concluir que esta laje verifica a segurança para uma resistência ao fogo de 90 minutos.

Método De Cálculo Tabelado. Resultados: Laje Maciça Simplesmente Apoiada

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda **Elemento em análise** Laje Maciça A

Resultados: Laje Maciça Simplesmente Apoiada Método De Cálculo Tabelado

Orientação da armadura principal Bidireccional

Verificação das dimensões mínimas

h_s (mm)	290	h_{tabelado} (mm)	100	Verificação	OK
a_s (mm)	30	a_{tabelado} (mm)	15	Verificação	OK

Tensão no aço

η_{fi}	0,588	$\sigma_{s,fi}$ (MPa)	293,8
-------------	-------	-----------------------	-------

Temperatura crítica da armadura

$k_{se,\theta}$	0,59
θ_{cr} (°C)	505,0
Verificação	OK

Ajuste da distância mínima ao eixo

Δa (mm)	-0
$a_{\text{tabelado novo}}$ (mm)	15
Verificação	OK

Voltar Concluir

Figura 68. Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 1).

7.1.2. Método de cálculo simplificado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $h = 0,21 + 0,03 + 0,05 = 0,30$ m;
- $a_s = c_{mec} = 0,03$ m;
- vão (maior) = 4,70 m;
- diâmetro = 10 mm;
- espaçamento = 200 mm;
- tipo de agregado – calcário;

- tipo de aço – endurecido a frio;
- $REI = 90$ min.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e, o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30. Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo simplificado “Laje – Face Inferior Exposta Ao Fogo”, como demonstrado na Figura 69.

Figura 69. Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 1).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá mostrar uma janela com os resultados, como demonstrado na Figura 70, onde se verifica que a laje em estudo se encontra em segurança ao fogo para uma resistência de 90 minutos.

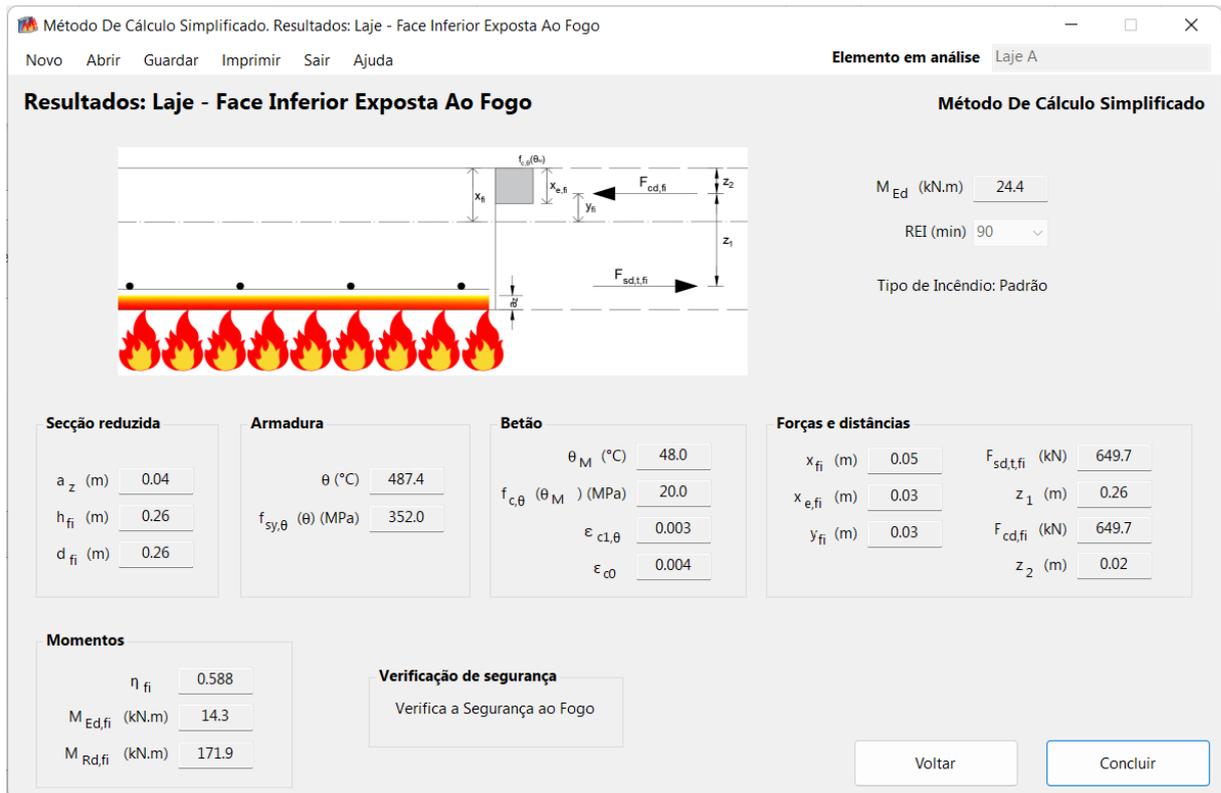


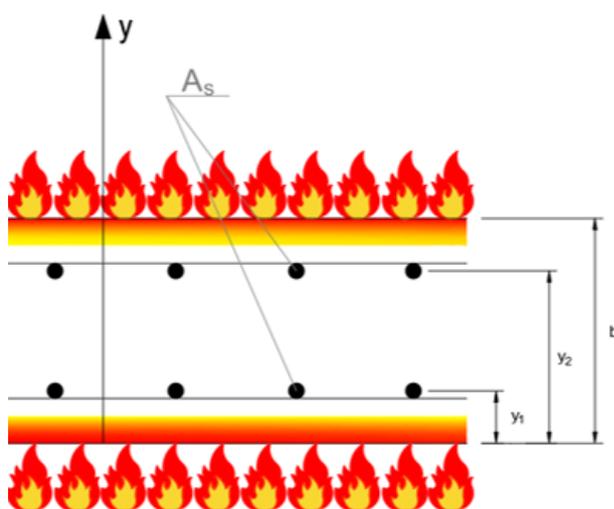
Figura 70. Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 1).

7.2.Exemplo 2 – Verificação da resistência ao fogo de uma parede

Pretende verificar-se se uma parede maciça resistente exposta ao fogo, em duas faces, se encontra em segurança para uma resistência ao fogo de 30 minutos.

Esta parede, representada na Figura 71, encontra-se num piso intermédio de um edifício com um comprimento de 3m, uma altura de 4m e uma largura de 0,40m. A sua armadura é constituída por 4Ø20.

Deverão ser consideradas as seguintes cargas uniformemente distribuídas: permanente de 15,00 kN/m e variáveis de 8,00 kN/m.

**Armadura:**

$$c_{mec} = 0,03 \text{ m}$$

Esforços

$$M_{Ed} = 100 \text{ kN.m}$$

$$N_{Ed} = 700 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = 600 \text{ kN}$$

Materiais:

Aço: A500 ER
laminado a quente

Betão: C25/30 com
agregados siliciosos

Figura 71. Representação de uma parede exposta ao fogo em duas faces em corte

7.2.1. Método de cálculo tabelado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $l = 4,00 \text{ m}$;
- $b = 3,00 \text{ m}$;
- $h_w = 0,40 \text{ m}$;
- $l_0 = 4,00 \text{ m}$;
- considerado: dois varões (V_1 e V_3) com $a_{s1} = a_{s3} = 0,03 \text{ m}$ e dois varões (V_2 e V_4) com $a_{s2} = a_{s4} = 0,40 - 0,03 = 0,37 \text{ m}$;
- $REI = 30 \text{ min}$;
- considerada como parede contraventada c com uma excentricidade de 1ª ordem em x.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e, o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire, no método de cálculo tabelado “Parede Resistente Maciça”, como demonstrado na Figura 72.

Método De Cálculo Tabelado. Parede Resistente Maciça

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda Elemento em análise Parede resistente

Parede Resistente Maciça Método De Cálculo Tabelado

REI (min)

N_{Ed} (kN)

N_{Rd} (kN)

M_{Ed} (kN.m)

Materiais

Betão

Aço

Ações e coeficientes

G (kN/m) γ_G γ_s

Q (kN/m) γ_Q

$\psi_{2,1}$ γ_c

Geometria

Parede contraventada

Localização da parede

Direcção da excentricidade de 1ª ordem

Face exposta ao fogo

l (m)

b (m)

h_w (m)

l_0 (m)

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Diâm. (mm)	20	20	20	20	0	0	0	0	0	0
a (m)	0.03	0.37	0.03	0.37	0	0	0	0	0	0

Figura 72. Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 2).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire, irá mostrar uma página com os resultados, como demonstrado na Figura 73.

Interpretando os resultados obtidos, esta parede possui uma largura (h_w) e uma distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo (a_s) superiores ao valor mínimo tabelado, a sua temperatura crítica (θ_{cr}) encontra-se dentro do intervalo estipulado pela EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020 e, a nova distância do eixo das armaduras à face exposta ao fogo ($a_{\text{tabelado novo}}$) é inferior ao valor da distância ao eixo das armaduras à face exposta (a_s) introduzido anteriormente.

Como todas as verificações apresentadas no XD-Fire para a parede em estudo são iguais a “OK”, é possível concluir que esta laje verifica a segurança para uma resistência ao fogo de 30 minutos.

Método De Cálculo Tabelado. Resultados: Parede Resistente Maciça

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda **Elemento em análise** Parede resistente

Resultados: Parede Resistente Maciça

Método De Cálculo Tabelado

Forças		Dimensões e verificação das condições mínimas			
$N_{Ed,fi}$ (kN)	377.7	e (m)	0.1	Verificação $e < 25\%$ dimensão afetada pela direção da excentricidade	OK
$M_{Ed,fi}$ (kN.m)	54.0	Relação l / h_w	10	Verificação	OK
μ_{fi}	0.63	$l_{0,fi}$ (m)	2.0	$l_{0,fi} / l_0$	0.5
				l_0' (m)	0.0
				Verificação	OK

Verificação das dimensões mínimas			
h_w (mm)	400	$h_{w,tabelado}$ (mm)	126
a (mm)	200	$a_{tabelado}$ (mm)	10
		Verificação	OK
		Verificação	OK

Tensão no aço		Temperatura crítica da armadura		Ajuste da distância mínima ao eixo	
η_{fi}	0.540	$k_{se,\theta}$	0.54	Δa (mm)	-2
$\sigma_{s,fi}$ (MPa)	269.8	θ_{cr} (°C)	524.2	$a_{tabelado\ novo}$ (mm)	8
		Verificação	OK	Verificação	OK

Voltar Concluir

Figura 73. Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 2).

7.2.2. Método de cálculo simplificado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $h = 4,00$ m;
- $b = 0,40$ m;
- $l = 3,00$ m;
- diâmetro = 20 mm;
- duas camadas de varões:
 - camada 1: $y_1 = 0,03$ m;
 - camada 2: $y_2 = 0,40 - 0,03 = 0,37$ m.
- tipo de agregado – siliciosos;
- tipo de aço – laminado a quente;
- considerado um modulo de elasticidade à temperatura ambiente de $E_s = 200\ 000$ MPa;
- $REI = 30$ min.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e, o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30. Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo simplificado “Parede – Duas Faces Expostas Ao Fogo”, como demonstrado na Figura 74.

Método De Cálculo Simplificado, Parede - Duas Faces Exposta Ao Fogo

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise: Parede A

Parede - Duas Faces Expostas Ao Fogo Método De Cálculo Simplificado

Materiais

Betão: C25/30
Aço: A500 ER

Tipo de agregados: Siliciosos
Tipo de aço: Laminado a quente

Ações e coeficientes

M_{Ed} (kN.m): 100.00
 N_{Ed} (kN.m): 700.00
R (min): 30
Tipo de Incêndio: Padrão

G (kN/m): 15.00
 Q (kN/m): 8.00
 $\psi_{2,1}$: 0.30

γ_G : 1.35
 γ_Q : 1.50
 γ_c : 1.00

γ_s : 1.00

Geometria da secção

h (m): 4.00
b (m): 0.40
 c_{mec} (m): 0.03
l (m): 3.00

Armadura

Número de Varões: 4
 E_s (MPa): 200000

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
Diâm. (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
y_i (m)	0.03	0.37	0.03	0.37	0.03	0.27	0.03	0.27	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

Voltar Calcular

Figura 74. Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 2).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá demonstrar uma janela com os resultados, como demonstrado na Figura 75, onde se verifica que a parede em estudo se encontra em segurança ao fogo para uma resistência de 30 minutos.

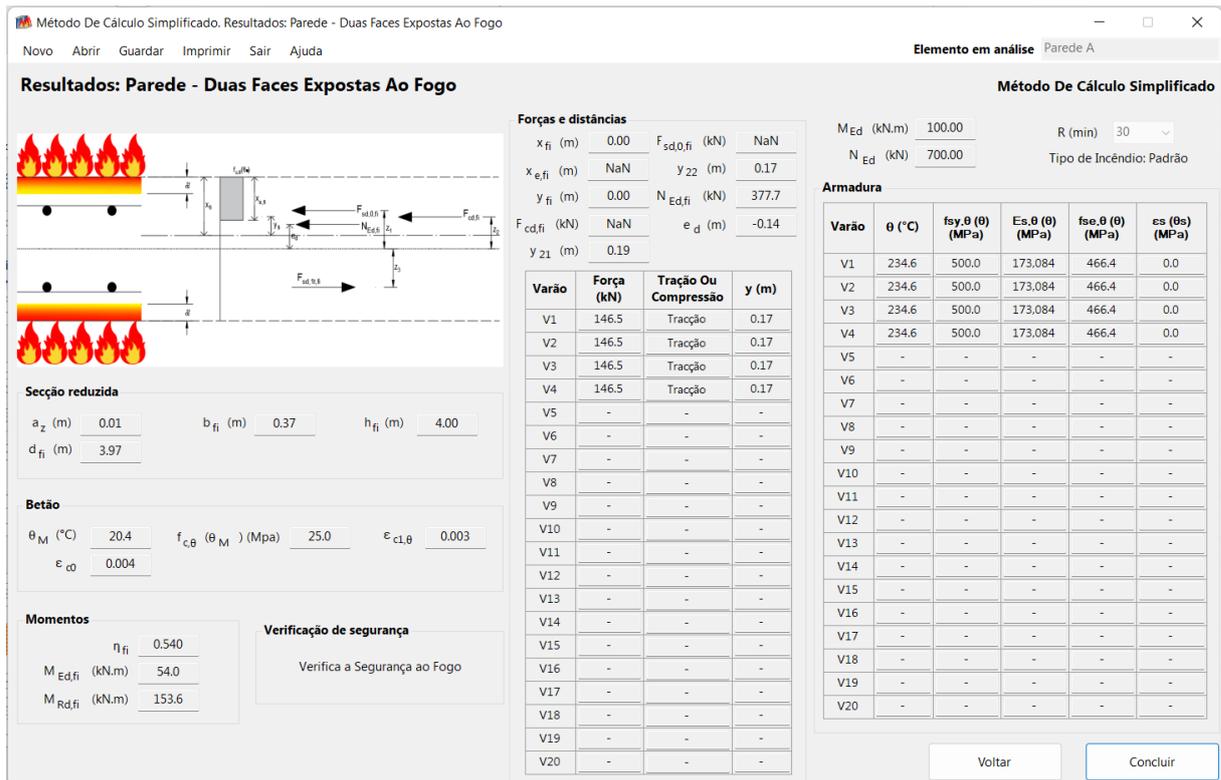


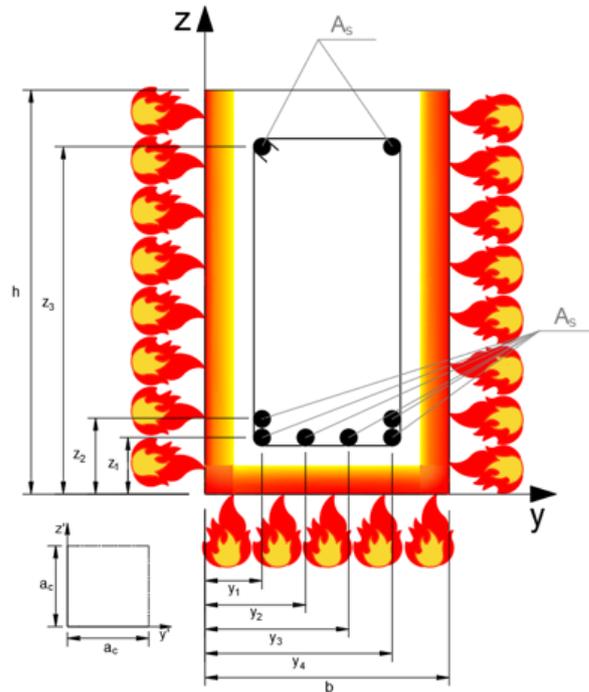
Figura 75. Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 2).

7.3.Exemplo 3 – Verificação da resistência ao fogo de uma viga

Pretende verificar-se se uma viga contínua exposta ao fogo, em três faces, se encontra em segurança para uma resistência ao fogo de 60 minutos.

A secção transversal desta viga, representada na Figura 76, apresenta uma largura de 0,30m e uma altura de 0,50m.

Devem ser consideradas as seguintes cargas uniformemente distribuídas: permanente de 3,00 kN/m e variáveis de 8,00 kN/m.

**Armadura:**

$c_{mec} = 0,03$ m
8Ø20

Esforços

$M_{Ed} = 400$ kN.m

Materiais:

Aço: A500 ER
laminado a quente

Betão: C25/30 com
agregados siliciosos

Figura 76. Representação de seção transversal de uma viga exposta ao fogo em três faces.

7.3.1. Método de cálculo tabelado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $b = 0,30$ m (tipo A – largura constante);
- $h = 0,50$ m;
- considerando que a_s é medido tendo em conta a face inferior exposta ao fogo:
 - V₁, V₂, V₃ e V₄: $a_{s1} = a_{s2} = a_{s3} = a_{s4} = 0,03$ m;
 - V₅ e V₆: $a_{s5} = a_{s6} = 0,07$ m;
 - V₇ e V₈: $a_{s7} = a_{s8} = 0,50 - 0,03 = 0,47$ m.
- REI = 60 min.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016), e o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo tabelado “Viga Contínua”, como demonstrado na Figura 77.

Método De Cálculo Tabelado. Viga Contínua

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda Elemento em análise Viga B

Viga Contínua Método De Cálculo Tabelado

Materiais R (min) 60 Betão C25/30 Aço A500 ER Personalizar

Ações e coeficientes G (kN/m) 3.00 Q (kN/m) 8.00 γ_G 1.35 γ_Q 1.50 γ_s 1.00 γ_c 1.00 $\psi_{2,1}$ 0.30

Geometria Tipo de secção transversal Tipo A Vigas com multiplas camadas de varões? Sim Face exposta ao fogo Inferior

Tipo A - Largura Constante Tipo B - Largura Variável Tipo C - Secção em I

b (m) 0.30 b_w (m) 0 d_1 (m) 0 d_2 (m) 0

Apoio de extremidade tem resistência à flexão? Não $V_{Ed} > 2/3V_{Rd,max}$, no primeiro apoio? Sim

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Diâm. (mm)	20	20	20	20	20	20	20	20	0	0
a (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.07	0.07	0.47	0.47	0	0

Voltar Calcular

Figura 77. Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 3).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá demonstrar uma página com os resultados, como demonstrado na Figura 78.

Interpretando os resultados obtidos, esta viga possui uma largura (b) e uma distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo (a_s) superiores ao valor mínimo tabelado, a sua temperatura crítica (θ_{cr}) encontra-se dentro do intervalo estipulado pela EN 1992-1-2 de 2020 e, a nova distância do eixo das armaduras à face exposta ao fogo ($a_{tabelado\ novo}$) é inferior ao valor da distância ao eixo das armaduras à face exposta (a_s) introduzido anteriormente.

Como todas as verificações apresentadas no XD-Fire para a viga em estudo são iguais a “OK”, é possível concluir que esta laje verifica a segurança para uma resistência ao fogo de 60 minutos.

Método De Cálculo Tabelado. Resultados: Viga Contínua

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise Viga B

Resultados: Viga Contínua

Método De Cálculo Tabelado

Verificação das dimensões mínimas

b (mm)	300	b _{tabelado} (mm)	200	Verificação	OK
b _w (mm)	0	b _{w,tabelado} (mm)	0	Verificação	OK
a (mm)	150	a _{tabelado} (mm)	12	Verificação	OK

Tensão no aço

η_{fi}	0.336
$\sigma_{s,fi}$ (MPa)	168.2

Temperatura crítica da armadura

$k_{se,\theta}$	0.34
θ_{cr} (°C)	605.4
Verificação	OK

Ajuste da distância mínima ao eixo

Δa (mm)	-11
a _{tabelado novo} (mm)	1.5
Verificação	OK

Ajuste da largura mínima

b _{mod} (mm)	-
b _{tabelado novo} (mm)	-
Verificação	-



Voltar
Concluir

Figura 78. Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 3).

7.3.2. Método de cálculo simplificado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $h = 0,50$ m;
- $b = 0,30$ m;
- diâmetro = 20 mm;
- três camadas de varões:
 - camada 1:
 - $V_1: z_1 = 0,03$ m, $y_1 = 0,03$ m;
 - $V_2: z_2 = 0,03$ m, $y_2 = 0,11$ m;
 - $V_3: z_3 = 0,03$ m, $y_3 = 0,19$ m;
 - $V_4: z_4 = 0,03$ m, $y_4 = 0,30 - 0,03 = 0,27$ m;
 - camada 2:
 - $V_5: z_5 = 0,07$ m, $y_5 = 0,03$ m;
 - $V_6: z_6 = 0,07$ m, $y_6 = 0,30 - 0,03 = 0,27$ m.

- camada 3:
 - $V_7: z_7 = 0,50 - 0,03 = 0,47\text{m}, y_7 = 0,03 \text{ m};$
 - $V_8: z_8 = 0,50 - 0,03 = 0,47\text{m}, y_8 = 0,30 - 0,03 = 0,27 \text{ m}.$
- como existem dois varões de canto expostos ao fogo, será necessário atribuir um valor para a distância no eixo horizontal e vertical (y' e z') destes cantos que deverá encontrar-se entre 0 e a_c sendo $a_c = 0,04$ para uma resistência igual ou inferior a 60 minutos. Neste caso será atribuído um valor de $y' = z' = 0,04 \text{ m}.$
- tipo de agregado – siliciosos;
- tipo de aço – laminado a quente;
- $REI = 60 \text{ min}.$

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e, o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2 de 2020 deverá ser considerada igual a 0,30. Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire, no método de cálculo simplificado “Vigas – Três Faces Expostas Ao Fogo”, como demonstrado na Figura 79.

Método De Cálculo Simplificado. Vigas - Três Faces Exposta Ao Fogo

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise Viga B

Vigas - Três Faces Expostas Ao Fogo

M_{Ed} (kN.m) 400.00

R (min) 60

Tipo de Incêndio: Padrão

Materiais

Betão C25/30

Aço A500 ER

Personalizar

Tipo de agregados Siliciosos

Tipo de aço Laminado a quente

Geometria da seção

h (m) 0.50

b (m) 0.30

c_{mec} (m) 0.03

Ações e coeficientes

G (kN/m) 3.00 $\psi_{2,1}$ 0.30 γ_Q 1.50 γ_s 1.00

Q (kN/m) 8.00 γ_G 1.35 γ_c 1.00

Armadura

Número de Varões 8 a_c (m) 0.04

Varão	Diâm. (mm)	y _i (m)	z _i (m)	Varão de Canto Exposto ao fogo	y' (m)	z' (m)
V1	20	0.03	0.03	Sim	0.04	0.04
V2	20	0.11	0.03	Não	0.05	0.05
V3	20	0.19	0.03	Não	0.05	0.05
V4	20	0.27	0.03	Sim	0.04	0.04
V5	20	0.03	0.07	Não	0.05	0.05
V6	20	0.27	0.07	Não	0.05	0.05
V7	20	0.03	0.47	Não	0.05	0.05
V8	20	0.27	0.47	Não	0.05	0.05
V9	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V10	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V11	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V12	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V13	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V14	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V15	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V16	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V17	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V18	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V19	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05
V20	20	0.30	0.50	Não	0.05	0.05

Voltar Calcular

Figura 79. Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 3).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá mostrar uma janela com os resultados, como demonstrado na Figura 80, em que se verifica que a viga em estudo se encontra em segurança ao fogo para uma resistência de 60 minutos.

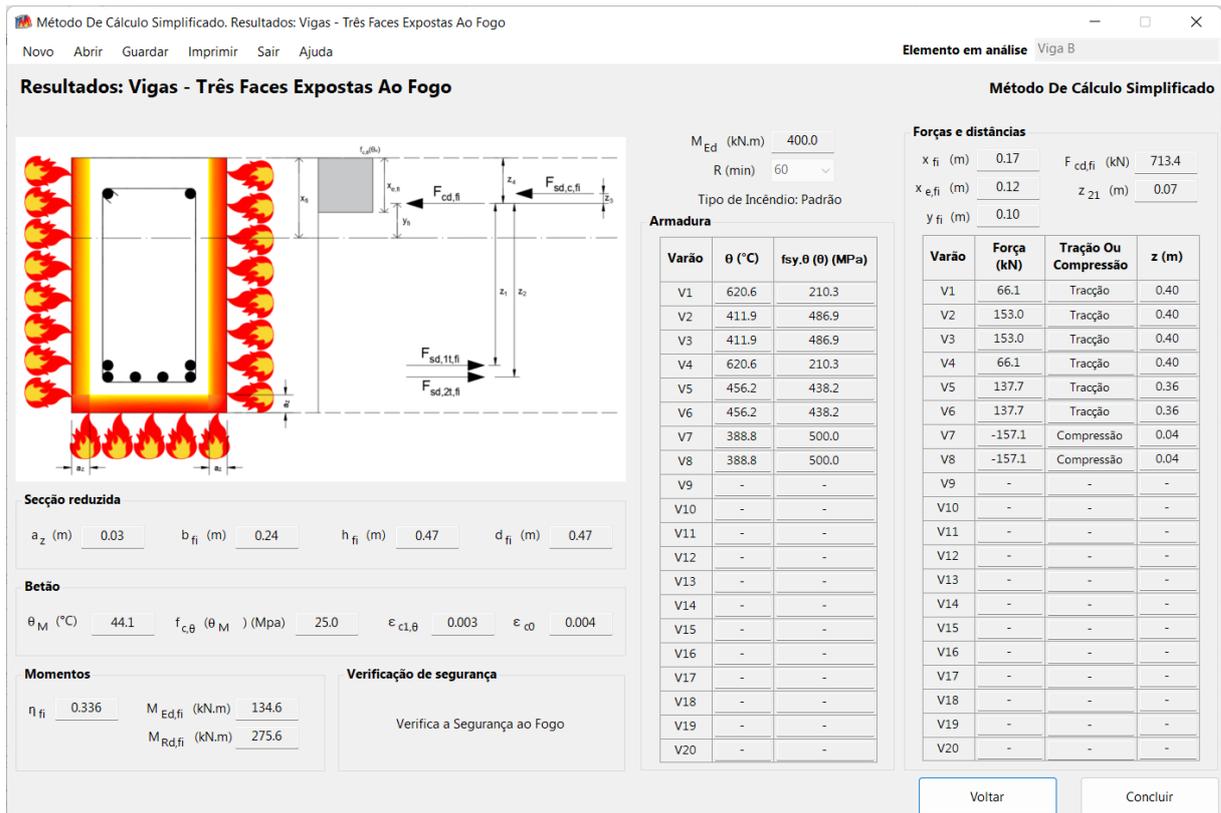


Figura 80. Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 3).

7.4.Exemplo 4 – Verificação da resistência ao fogo de um pilar

Pretende-se verificar se um pilar exposto ao fogo em quatro faces encontra-se em segurança para uma resistência ao fogo de 90 minutos.

A secção transversal deste pilar, representada na Figura 81, apresenta uma largura de 0,30m e uma altura de 0,50m. Este pilar, com 4m de altura, pertence a um piso intermédio de uma estrutura não contraventada.

Devem ser consideradas as seguintes cargas uniformemente distribuídas: permanente de 15,00 kN/m e variáveis de 8,00 kN/m.

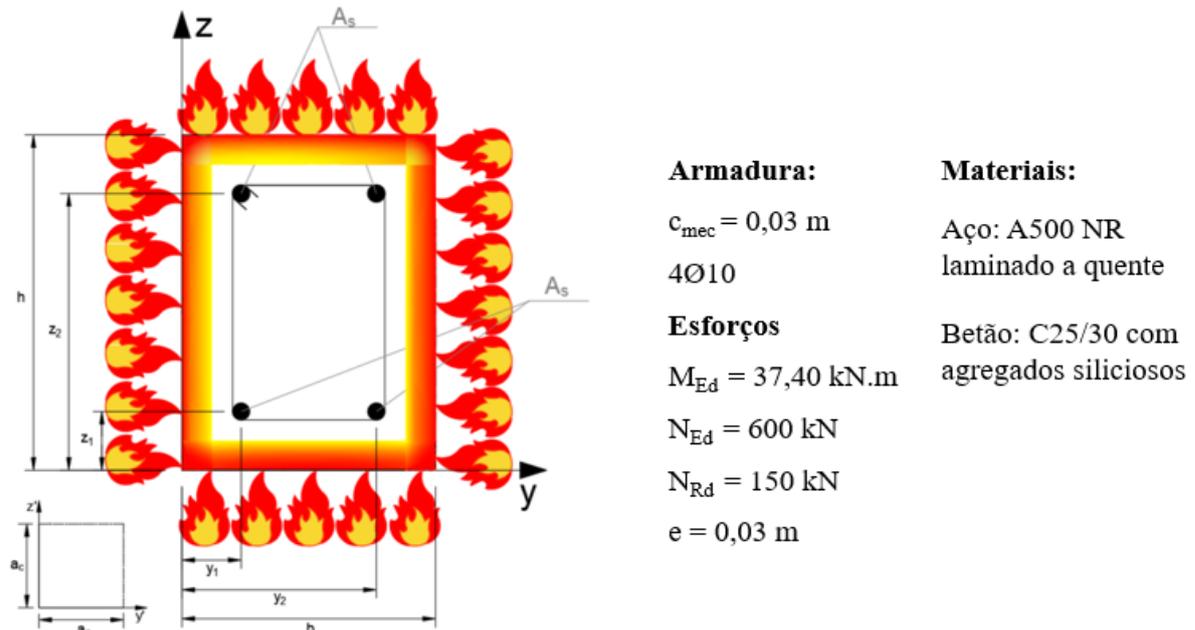


Figura 81. Representação de seção transversal de um pilar exposto ao fogo em quatro faces.

7.4.1. Método de cálculo tabelado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $b = 0,30 \text{ m}$;
- $h = 0,50 \text{ m}$;
- $l = 4,00 \text{ m}$;
- V_1, V_2, V_3, V_4 : $a_{s1} = a_{s2} = a_{s3} = a_{s4} = 0,03 \text{ m}$;
- considerado que V_1 e V_2 encontram-se na zona tracionadas da secção e, V_3 e V_4 encontram-se na zona comprimida;
- $REI = 90 \text{ min}$.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,i}$), segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020 deverá ser considerado igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo tabelado “Pilar – Método B”, como demonstrado na Figura 82.

Método De Cálculo Tabelado. Pilar - Método B

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda Elemento em análise: Pilar B

Pilar - Método B Método De Cálculo Tabelado

Materiais
 Betão: C25/30
 Aço: A500 NR
 Personalizar

Ações e coeficientes
 G (kN/m): 15.00 γ_G : 1.35 γ_s : 1.00
 Q (kN/m): 8.00 γ_Q : 1.50
 $\psi_{2,1}$: 0.30 γ_c : 1.00

Geometria
 Localização do pilar: Intermédia l (m): 4.00 b (m): 0.40 h (m): 0.50
 Tipo de secção transversal: Rectangular d (m): 0.40 I_0 (m): 4.00 e (m): 0.03

Varão	V1	V2	V3	V4	V5
Diâmetro (mm)	10	10	10	10	0
a (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0
Traccionado?	Sim	Sim	Não	Não	Não
Varão	V6	V7	V8	V9	V10
Diâmetro (mm)	0	0	0	0	0
a (m)	0	0	0	0	0
Traccionado?	Não	Não	Não	Não	Não

Voltar Calcular

Figura 82. Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 4).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá mostrar uma página com os resultados, como demonstrado na Figura 83.

Interpretando os resultados obtidos, este pilar possui uma largura (b) e a distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo (a_s) superiores ao valor mínimo tabelado, a sua temperatura crítica (θ_{cr}) encontra-se dentro do intervalo estipulado pela EN 1992-1-2 de 2020 e, a nova distância do eixo das armaduras à face exposta ao fogo ($a_{\text{tabelado novo}}$) é inferior ao valor da distância ao eixo das armaduras à face exposta (a_s) introduzido anteriormente. Contudo, não se verifica a segurança no comprimento efetivo do pilar à temperatura ambiente (l_0) e o grau de reforço mecânico modificado (ω_{mod}).

Como algumas das verificações apresentadas no XD-Fire para o pilar em estudo não são iguais a “OK”, pode concluir-se que o pilar não verifica a segurança para uma resistência ao fogo de 90 minutos.

Método De Cálculo Tabelado. Resultados: Pilar - Método B

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda Elemento em análise

Resultados: Pilar - Método B Método De Cálculo Tabelado

Forças

$N_{Ed,fi}$ (kN)

μ_{fi}

Dimensões e verificação das condições mínimas

$l_{0,fi}$ (m) ω_{mod} Nº mínimo de varões

Verificação $b \leq l$ OK $0.1 \leq \omega_{mod} \leq 1.0$ KO Verificação nº mínimo de varões OK

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Verificação $a \geq 1,5\phi_s$	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-	-	-

Verificação das dimensões mínimas

b (mm) b_{tabela} (mm) Verificação OK

a (mm) a_{tabela} (mm) Verificação OK

l_0 (m) $l_{0,max}$ (m) Verificação KO

Tensão no aço

η_{fi} $\sigma_{s,fi}$ (MPa)

Temperatura crítica da armadura

$k_{se,\theta}$ θ_{cr} (°C)

Verificação OK

Ajuste da distância mínima ao eixo

Δa (mm) $a_{tabela\ novo}$ (mm)

Verificação OK

Figura 83. Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 4).

7.4.2. Método de cálculo simplificado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $h = 0,50$ m;
- $b = 0,30$ m;
- $l = 4,00$ m;
- diâmetro = 10 mm;
- três camadas de varões:
 - camada 1:
 - $V_1: z_1 = 0,03$ m, $y_1 = 0,03$ m;
 - $V_2: z_2 = 0,03$ m, $y_2 = 0,30 - 0,03 = 0,27$ m;
 - camada 2:
 - $V_3: z_3 = 0,50 - 0,03 = 0,47$ m, $y_3 = 0,03$ m;
 - $V_4: z_4 = 0,50 - 0,03 = 0,47$ m, $y_4 = 0,30 - 0,03 = 0,27$ m.

- como existem dois varões de canto expostos ao fogo, será necessário atribuir um valor para a distância no eixo horizontal e vertical (y' e z') destes cantos que deverá encontrar-se entre 0 e a_c sendo $a_c = 0,10$ para uma resistência superior a 60 minutos. Neste caso será atribuído um valor de $y' = z' = 0,02$ m.
- tipo de agregado – siliciosos;
- tipo de aço – laminado a quente;
- $E_s = 200000$ MPa;
- $REI = 90$ min.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e, o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2005 deverá ser considerada igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo simplificado “Pilar – Quatro Faces Expostas Ao Fogo”, como demonstrado na Figura 84.

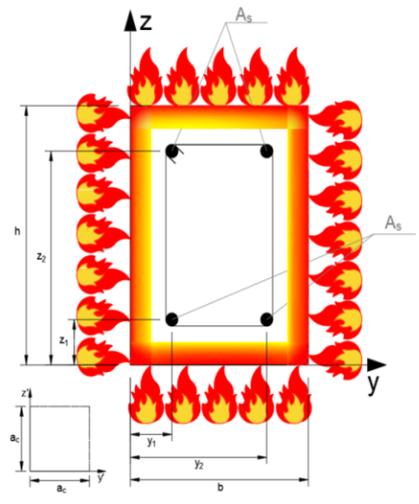
Método De Cálculo Simplificado. Pilar - Quatro Faces Exposta Ao Fogo

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise: Pilar A

Pilar - Quatro Faces Expostas Ao Fogo

Método De Cálculo Simplificado



M_{Ed} (kN.m) 37.40

N_{Ed} (kN) 600.00

R (min) 90

Tipo de Incêndio: Padrão

Materiais

Betão C25/30

Aço A500 NR

Personalizar

Tipo de agregados Siliciosos

Tipo de aço Laminado a quente

Geometria da secção

h (m) 0.50

b (m) 0.30

c_{mec} (m) 0.03

l (m) 4.00

Armadura

Número de Varões 4 a_c (m) 0.10 E_s (MPa) 200000

Varão	Diâm. (mm)	y_i (m)	z_i (m)	Varão de Canto Exposto ao fogo	y' (m)	z' (m)
V1	10	0.03	0.03	Sim	0.02	0.02
V2	10	0.27	0.03	Sim	0.02	0.02
V3	10	0.03	0.47	Sim	0.02	0.02
V4	10	0.27	0.47	Sim	0.02	0.02
V5	10	0.03	0.07	Não	0.02	0.02
V6	10	0.27	0.07	Não	0.02	0.02
V7	10	0.03	0.47	Não	0.02	0.02
V8	10	0.27	0.47	Não	0.02	0.02
V9	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V10	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V11	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V12	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V13	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V14	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V15	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V16	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V17	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V18	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V19	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02
V20	10	0.30	0.50	Não	0.02	0.02

Ações e coeficientes

G (kN/m) 15.00 γ_G 1.35 γ_s 1.00

Q (kN/m) 8.00 γ_Q 1.50

$\psi_{2,1}$ 0.30 γ_c 1.00

Voltar Calcular

Figura 84. Introdução de dados no programa pelo método de calculo simplificado (exemplo 4).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire irá demonstrar uma janela com os resultados, como demonstrado na Figura 85, onde se verifica que o pilar em estudo se encontra em segurança ao fogo para uma resistência de 90 minutos.

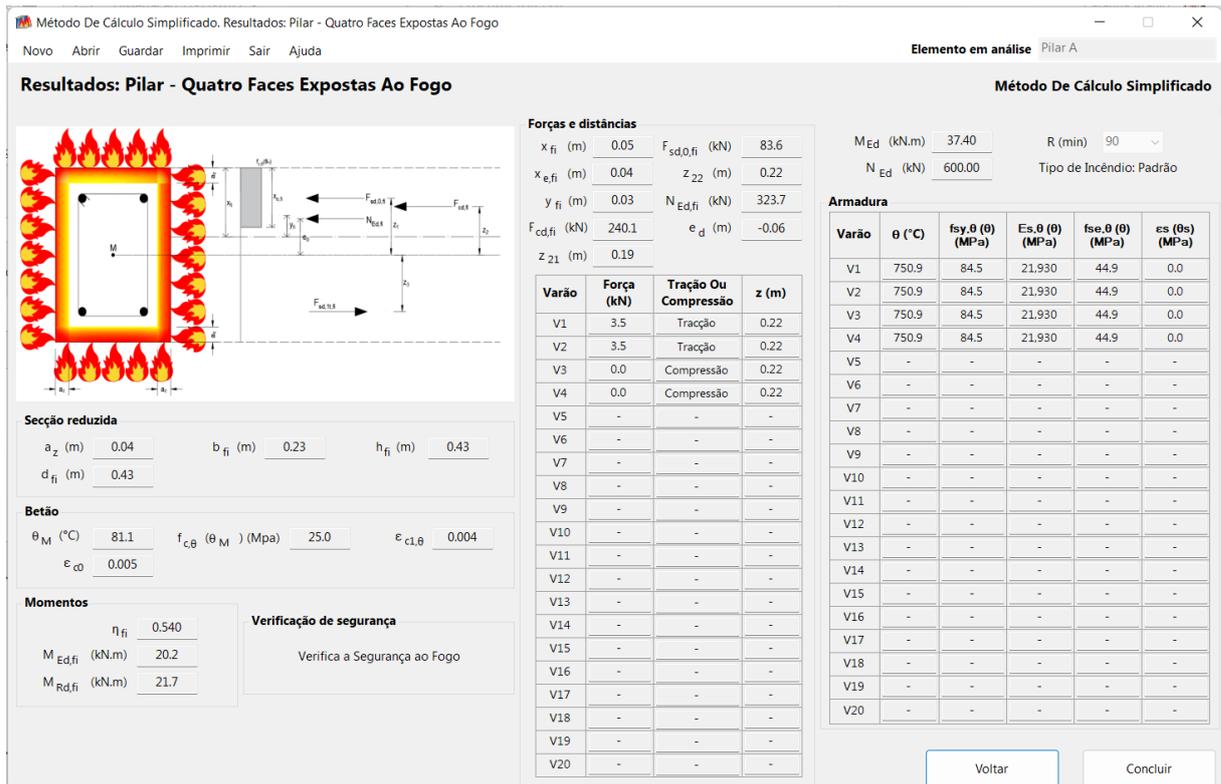


Figura 85. Resultados obtidos pelo programa pelo método de cálculo simplificado (exemplo 4).

7.5.Exemplo 5 – Verificação da resistência ao fogo de um elemento tracionado

Pretende verificar-se se um elemento tracionado, exposto ao fogo, se encontra em segurança para uma resistência ao fogo de 30 minutos.

Este elemento tracionado apresenta uma secção transversal retangular com uma largura de 0,30m e uma altura de 0,40m. A sua armadura é constituída por 6Ø20 numa única camada.

Deverão ser consideradas as seguintes cargas uniformemente distribuídas: permanente de 3,00 kN/m e variáveis de 8,00 kN/m. Betão C20/25 com agregados calcários e aço A500 NR SD laminado a quente.

7.5.1. Método de cálculo tabelado

Através dos dados fornecidos é possível determinar que:

- $b = 0,30$;
- $A_c = 0,30 \times 0,40 = 0,12 \text{ m}^2$;

- humidade (u %) não especificado;
- $\rho(20^{\circ}\text{C}) = 2500 \text{ kg/m}^3$;
- varões V_1, V_2, V_3 e V_4 : $a_{s1} = a_{s2} = a_{s3} = a_{s4} = 0,03 \text{ m}$;
- $REI = 30 \text{ min}$.

Para casos desfavoráveis, o coeficiente de segurança para ações permanentes (γ_G) e o coeficiente de segurança para ações variáveis deverão ser, respetivamente, iguais a 1,35 e 1,5.

Os coeficientes parciais de segurança para betão e aço em situação de incêndio (γ_c e γ_s), deverão assumir um valor de 1,0 (Cachim & Morais, 2016) e o coeficiente de combinação para os valores quase-permanentes ($\psi_{2,1}$) segundo a EN 1992-1-2, parte 1-2 de 2020, deverá ser considerada igual a 0,30.

Todos estes valores deverão ser inseridos no XD-Fire no método de cálculo tabelado “Elementos Traccionados”, como demonstrado na Figura 86.

Varão	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Diâm. (mm)	20	20	20	20	20	20	0	0	0	0
a (m)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0	0	0	0

Figura 86. Introdução de dados no programa pelo método tabelado (exemplo 5).

Ao proceder com o cálculo, o XD-Fire, irá mostrar uma página com os resultados, como demonstrado na Figura 87.

São apresentados os resultados para a extensão excessiva e para a extensão reduzida. Para a extensão reduzida são apresentados os resultados para as propriedades mecânicas e térmicas

do aço e do betão. Para a extensão excessiva, verifica-se que a largura da secção (b) e a distância ao eixo da armadura à face exposta ao fogo (a_s) superiores ao valor mínimo tabelado, a sua temperatura crítica (θ_{cr}) encontra-se dentro do intervalo estipulado pela EN 1992-1-2 de 2020 e, a nova distância do eixo das armaduras à face exposta ao fogo ($a_{\text{tabelado novo}}$) é inferior ao valor da distância ao eixo das armaduras à face exposta (a_s) introduzido anteriormente.

Como todas as verificações apresentadas no XD-Fire para o elemento tracionado em estudo são iguais a “OK”, é possível concluir que este elemento tracionado verifica a segurança para uma resistência ao fogo de 30 minutos.

Método De Cálculo Tabelado. Resultados: Elementos Traccionados

Novo Abrir Guardar Imprimir Sair Ajuda

Elemento em análise Viga 1

Resultados: Elementos Traccionados Método De Cálculo Tabelado

Extensão Excessiva

Verificação das condições mínimas
 $A_c > 2(b_{\text{min}})^2$ OK

Verificação das dimensões mínimas

b (mm)	300	b _{tabelado} (mm)	200	Verificação	OK
b _w (mm)	0	b _{w,tabelado} (mm)	0	Verificação	OK
a (mm)	30	a _{tabelado} (mm)	15	Verificação	OK

Tensão no aço
 η_{fi} 0.336
 $\sigma_{s,fi}$ (MPa) 168.2

Temperatura crítica da armadura
 $k_{se,\theta}$ 0.34
 θ_{cr} (°C) 605.4
 Verificação OK

Ajuste da distância mínima ao eixo
 Δa (mm) -11
 $a_{\text{tabelado novo}}$ (mm) 4
 Verificação OK

Ajuste da largura mínima
 b_{mod} (mm) -
 $b_{\text{tabelado novo}}$ (mm) -
 Verificação -

Extensão Reduzida

Betão - Propriedades térmicas
 ϵ_c 0.70
 λ_c (W/m.K) 0.75
 $\rho(\theta_c)$ (kg/m³) 2,330

u não especificado	
u (%)	0
cp(θc) (J/kg.K)	0

u não especificado			
u (%)	0	1.5	3.0
cp(θc) (J/kg.K)	1,100	1,100	1,100

Betão - Propriedades mecânicas
 $k_{c,\theta}$ 0.61
 $\epsilon_{c1,\theta}$ 0.025
 $\epsilon_{cu1,\theta}$ 0.025
 ϕ 0.55
 $f_{c,\theta,20^\circ C}$ (MPa) 11.0
 $k_{ct,\theta}$ 0.00
 $\epsilon_{ct,\theta}$ (θ) 0.007

Aço - Propriedades mecânicas
 $k_{sy,\theta}$ 0.46
 $k_{sp,\theta}$ 0.17
 $k_{se,\theta}$ 0.34
 $k_{Es,\theta}$ 0.30
 $\epsilon_s(\theta_s)$ 0.008

Voltar Concluir



Figura 87. Resultados obtidos pelo programa pelo método tabelado (exemplo 5).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Conclusões

Um elemento estrutural de betão armado apresenta uma baixa condutividade térmica; pelo que, estando este exposto ao fogo, as suas zonas mais exteriores serão as mais afetadas. De modo que as armaduras não sejam afetadas por elevadas temperaturas, deverão ser considerados maiores recobrimentos permitindo, assim, uma maior proteção das armaduras. Este aumento dos recobrimentos tornará o elemento estrutural mais resistente ao fogo, mas deveram ser adotadas tolerâncias de forma a minimizar o erro de colocação das armaduras em obra. Por outro lado, a aplicação de grandes recobrimentos poderá originar problemas de destacamento do betão, possibilitando a exposição das armaduras.

O programa desenvolvido, XD-Fire, é um programa atualmente inovador, pois tem por base da sua criação a EN 1992-1-2 parte 1-2, de 2020 que ainda não se encontra introduzida e traduzida em Portugal. Este software engloba grande parte dos casos da verificação da resistência ao fogo em elementos estruturais de betão armado. Devido à sua simples e fácil utilização, este torna-se acessível a todos, permitindo a sua utilização em situações práticas de projeto, bem como no apoio à resolução de exercícios académicos.

Todos os cálculos apresentados no XD-Fire foram previamente efetuados com a utilização do Microsoft Office Excel, de forma a facilitar o processo de programação. Sendo a linguagem de programação utilizada versátil e de fácil extensibilidade, permite facilmente ao utilizador efetuar alterações e acréscimos de funcionalidades e código no programa. Isto permite verificar que o processo de programação poderá seguir vários caminhos, alcançar novas metas. Nada está totalmente finalizado, pois existe sempre algo que poderá ser acrescentado ou melhorado no trabalho desenvolvido.

8.2. Trabalhos Futuros

Apesar de os objetivos propostos terem sido alcançados, existem ainda algumas funcionalidades que não foram incorporadas nesta fase do XD-Fire e que, provavelmente, proporcionariam a este software ser mais completo e abrangente. Dessas melhorias, a efetuar destaca-se a incorporação da verificação da resistência ao fogo de elementos estruturais compostos por armadura de pré-esforço, e a introdução de outros idiomas para este software possa ser de uso universal.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu, A. H. B. A. K. (2017). *Structural Design For Fire Safety* (2 ed.). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Cachim, P. B., & Morais, M. M. (2016). *Estruturas de Betão. Bases de Cálculo - Segundo o Eurocódigo 2*. (2 ed.). Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- CEN. (2020). *Eurocode 2 - Design of concrete structures. Part 1-2: General. Structural fire design (revisão final de novembro de 2020)*. Bruxelas: European Committee for Standardization.
- Chan, J. (2015). *Learn C# in one day and learn it well* (1 ed.). S/L: CreateSpace.
- Clark, D. (2013). *Beginning C# object-oriented programming*. Nova Iorque: Springer Science and Business Media.
- Deitel, H. M., Deitel, P. J., Nieto, T. R., Yaeger, C. H., Zlatkina, M., & Listifield, J. (2001). *C# How to Program* (1 ed.). S/L: Deitel.
- Della-Giustina, D. E. (2014). *Fire Safety Management Handbook* (3 ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Denoël, J. F. (2007). *Fire Safety and Concrete Structures*. Brussels: FEBELCEM.
- Fernandes, M. C. V. (2008). *Verificação da resistência ao fogo de estruturas de betão com base nos métodos simplificados do EC2 – Parte 1-2*. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Gonçalves, T. F. D. (2008). *Resistência ao Fogo de Estruturas de Betão - Comportamento Global de Estruturas em Situação de Incêndio*. (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Guimarães, N. B. T. (2010). *Resistência ao fogo de estruturas de betão. Modelação numérica dos métodos tabelados e simplificados e aplicação a um projecto*. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- IPQ. (1993). *NP EN 2 - Classes de fogos*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2005). *NP EN 2, 1993/A1 - Classes de fogos*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2009a). *Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2009b). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas. Parte 1-1: Acções gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

- IPQ. (2010a). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas. Parte 1-2: Acções gerais. Acções em estruturas expostas ao fogo*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2010b). *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- IPQ. (2010c). *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-2: Regras gerais. Verificação de resistência ao fogo*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- Khoury, G. A., Anderberg, Y., Both, K., Fellingner, J., Høj, N. P., & Majorana, C. (2007). *Bulletin 38: Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling* (1 ed.). Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib).
- Kordina, K. R. (2010). Design of concrete building for fire resistance. In G. L. Balázs (Ed.), *Bulletin 54: Structural Concrete. Textbook on Behaviour, Design and Performance* (2 ed., Vol. 4). Lausanne: International Federatios for Structural Concrete (fib).
- Loureiro, H. (2017). *C# 7.0 com Visual Studio. Curso Completo*. Lisboa: FCA.
- Perkins, B., Hammer, J. V., & Reid, J. D. (2018). *Beginning C# 7 with Visual Studio 2017*. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.
- Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., & Hurley, M. J. (2010). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. Maryland: National Institute of Standards and Technology.
- Price, M. J. (2019). *C# 8.0 and .NET Core 3.0 – Modern Cross-Platform Development* (4 ed.). Birmingham: Packt Publishing Ltd.
- Reis, A. d. S. (2011). *Determinação de cenários de incêndio em edifícios*. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Taerwe, L., Bamonte, P., Both, K., Denoël, J.-F., Diederichs, U., Dotreppe, J.-C., . . . Acker, A. V. (2008). *Bulletin 46: Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment* (1 ed.). Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib).
- Trigo, A., & Henriques, J. (2020). *Aprenda a programar em C#* (2.^a ed.). Lisboa: Edições Sílabo.
- Watson, K., Nagel, C., Pedersen, J. H., Reid, J., & Skinner, M. (2010). *Beginning Visual C# 2010*. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.

ANEXOS

Tabela A. Valores para os parâmetros de relação tensão-extensão para o betão com agregados siliciosos ou calcários a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).

Temperatura no betão, θ_c (°C)	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_{ck}$			$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
	$f_{ck} < 70$ Mpa		$f_{ck} \geq 70$ Mpa		
	Agregados Siliciosos	Agregados Calcários	Qualquer tipo de agregado		
20	1,00	1,00	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	1,00	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,97	0,75	0,0055	0,0250
300	0,85	0,91	0,75	0,0070	0,0275
400	0,75	0,85	0,75	0,0100	0,0300
500	0,60	0,74	0,60	0,0150	0,0325
600	0,45	0,60	0,45	0,0250	0,0350
700	0,30	0,43	0,30	0,0250	0,0375
800	0,15	0,27	0,15	0,0250	0,0400
900	0,08	0,15	0,08	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,06	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,02	0,01	0,0250	0,0475
1200	0,00	0,00	0,00	-	-

Tabela B. Valores para os parâmetros de relação tensão-extensão para aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio a temperaturas elevadas. Retirado de CEN (2020).

Temperatura do aço θ_s (°C)	$k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$k_{se,\theta} = f_{se,\theta} / f_{yk}$	$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$	
	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente ou Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,95	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,90	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,85	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,35	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela C. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 30 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 30 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			500			400			300			250			200		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$											
20 mm	25	12,3	10,9	9,5	10,1	8,8	7,8	7,7	6,7	5,8	5,2	4,6	3,7	4,0	3,3	2,7	2,9	2,4	1,9
20 mm	30	13,0	11,1	9,9	10,5	8,9	7,9	8,1	6,9	6,1	5,5	4,6	3,9	4,3	3,5	3,0	3,1	2,5	2,0
20 mm	40	16,3	12,3	11,1	13,1	10,1	8,9	10,0	7,9	6,9	6,1	5,1	4,4	5,1	4,0	3,4	3,5	2,7	2,3
20 mm	55	20,6	14,2	12,1	16,3	11,4	9,7	12,0	8,5	7,4	8,0	5,9	5,0	5,6	4,3	3,6	3,5	2,7	2,3
0,5 b	25	24,0	10,8	4,7	20,0	8,8	3,6	16,0	6,7	2,3	8,3	3,5		6,5	2,6		4,6	1,5	
0,5 b	30	24,0	15,1	7,8	20,0	12,1	6,2	16,0	9,1	4,5	12,0	4,8		10,0	3,6		6,7	2,4	
0,5 b	40	24,0	24,0	10,9	20,0	20,0	9,3	16,0	16,0	7,4	12,0	8,1	3,8	10,0	5,8	2,6	8,0	3,5	
0,5 b	55	24,0	24,0	20,4	20,0	20,0	15,9	16,0	16,0	11,1	12,0	12,0	6,4	10,0	10,0	3,8	8,0	4,0	
1,00 b	25	24,0	18,2	8,1	20,0	14,7	6,5	16,0	11,3	4,8	12,0	5,9		10,0	4,6		8,0	3,2	
1,00 b	30	24,0	24,0	12,1	20,0	20,0	9,8	16,0	15,6	7,4	12,0	8,3		10,0	6,4		8,0	4,4	
1,00 b	40	24,0	24,0	21,0	20,0	20,0	16,6	16,0	16,0	12,4	12,0	12,0	6,0	10,0	10,0	4,5	8,0	6,4	
1,00 b	55	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	11,0	10,0	10,0	6,6	8,0	7,6	

Tabela D. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 30 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 30 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
$b \text{ (mm)}$		≥ 600			500			400			300			250			200		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7
e_0	$a \text{ (mm)}$	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$														
20 mm	25	24,0	17,1	15,3	20,0	14,0	12,2	16,0	10,9	9,4	8,7	7,1	6,1	7,2	5,3	4,5	5,3	3,7	3,1
20 mm	30	24,0	18,8	16,6	20,0	15,3	13,4	16,0	11,5	10,2	12,0	7,7	6,4	10,0	6,0	5,1	8,0	4,2	3,5
20 mm	40	24,0	24,0	20,5	20,0	20,0	16,5	16,0	16,0	12,4	12,0	9,5	7,9	10,0	7,2	6,1	8,0	5,2	4,0
20 mm	55	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	11,6	10,0	10,0	7,2	8,0	5,0	4,0
0,5 b	25	24,0	24,0	14,1	20,0	20,0	11,1	16,0	16,0	81,0	12,0	9,6		10,0	6,9		8,0	4,3	
0,5 b	30	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	5,7	10,0	10,0	3,6	8,0	8,0	
0,5 b	40	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	12,0	10,0	10,0	10,0	8,0	8,0	5,4
0,5 b	55	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	12,0	10,0	10,0	10,0	8,0	8,0	8,0
1,00 b	25	24,0	24,0	17,3	20,0	20,0	14,3	16,0	16,0	11,1	12,0	12,0		10,0	10,0		8,0	7,5	
1,00 b	30	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	8,2	10,0	10,0	5,6	8,0	8,0	
1,00 b	40	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	12,0	10,0	10,0	10,0	8,0	8,0	8,0
1,00 b	55	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0	12,0	10,0	10,0	10,0	8,0	8,0	8,0

Tabela E. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 60 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 60 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$																	
$b \text{ (mm)}$		≥ 600			500			400			300			250			200					
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5
e_0	$a \text{ (mm)}$	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$					
20 mm	25	10,6	8,0	5,4	8,4	6,4	3,3	6,0	4,2		3,5	1,4		2,4								
20 mm	35	10,9	9,5	7,6	8,7	7,5	5,9	6,2	5,3	3,8	3,7	3,1		2,7	2,2							
20 mm	45	11,6	9,7	8,3	9,2	7,8	6,5	6,9	5,7	4,6	4,2	3,5	2,5	3,1	2,5				2,0			
20 mm	60	13,3	11,1	9,7	10,5	8,7	7,5	8,0	6,4	5,3	4,7	3,7	2,9	3,3	2,6				2,0			
0,5 b	25	5,0			3,8			2,2														
0,5 b	35	14,5	5,7		11,5	4,2		8,4	2,1		3,6			2,4								
0,5 b	45	24,0	10,6	3,3	20,0	8,2		16,0	5,8		6,9	2,0		4,6					2,4			
0,5 b	60	24,0	20,6	8,8	20,0	15,3	6,5	16,0	9,9	3,9	12,0	3,9		8,7	1,8				2,5			
1,00 b	25	8,2			6,6			4,8														
1,00 b	35	24,0	10,2		20,0	7,9		15,0	5,8		6,8			4,9								
1,00 b	45	24,0	18,7	8,3	20,0	14,6		16,0	10,6		12,0	4,9		9,0					5,3			
1,00 b	60	24,0	24,0	13,0	20,0	20,0	10,1	16,0	16,0	7,6	12,0	7,7		10,0	4,5				5,3			

Tabela F. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 60 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 60 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
$b \text{ (mm)}$		≥ 600			500			400			300			250			200		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5
e_0	$a \text{ (mm)}$	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$		
20 mm	25	15,4	12,6	8,9	12,2	9,9	5,6	8,9	6,6		4,9	2,2		3,5			2,1		
20 mm	35	16,8	14,4	12,6	13,4	11,3	9,9	10,1	8,1	6,4	5,7	4,7	2,1	4,2	3,4		2,6	2,3	
20 mm	45	23,5	16,1	13,9	17,5	12,8	10,9	12,2	9,2	7,8	6,9	5,3	4,2	4,9	3,8	2,7	3,1	2,6	2,2
20 mm	60	24,0	20,3	16,8	20,0	15,3	13,2	16,0	11,5	9,4	8,7	6,2	4,9	5,8	4,1	3,0	3,1	2,6	2,1
0,5 b	25	10,9			8,5			5,6											
0,5 b	35	24,0	14,8		20,0	10,9		16,0	7,1		9,9			6,2			2,4		
0,5 b	45	24,0	24,0	13,9	20,0	20,0		16,0	16,0		12,0	6,7		10,0			8,0	2,6	
0,5 b	60	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0		10,0	10,0		8,0	2,9	
1,00 b	25	16,1			12,8			9,1											
1,00 b	35	24,0	23,3		20,0	17,9		16,0	12,5		12,0			10,0			6,4		
1,00 b	45	24,0	24,0	21,3	20,0	20,0		16,0	16,0		12,0	12,0		10,0			8,0	7,2	
1,00 b	60	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0	20,0	16,0	16,0	16,0	12,0	12,0		10,0	10,0		8,0	8,0	

Tabela G. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 90 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 90 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$															
$b \text{ (mm)}$		≥ 600			500			400			350			300			250			
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5	
e_0	$a \text{ (mm)}$	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			
20 mm	30	8,9	6,6	3,1	6,9	5,1		4,8	2,8		3,7	1,9		2,3						
20 mm	40	9,2	7,8	5,4	7,2	6,0	3,5	5,1	4,2		4,0	3,2		2,8						
20 mm	55	10,4	8,8	7,3	8,2	6,8	5,5	5,9	4,7	3,5	4,6	3,7	2,5	3,4	2,6			2,2		
20 mm	70	12,0	9,7	8,3	9,2	7,5	6,2	6,5	5,2	3,9	5,1	4,0	2,8	3,6	2,7			2,2		
0,25 b	30	5,4	4,0		4,2	2,9		2,9			2,1									
0,25 b	40	7,1	5,0	3,1	5,5	3,9		3,8	2,5		3,0	1,8		1,6						
0,25 b	55	11,4	7,1	5,4	8,5	5,3	3,9	5,7	3,6	2,0	4,4	2,7		2,8						
0,25 b	70	24,0	8,8	6,6	20,0	6,6	4,8	8,1	4,3	2,5	6,0	3,1		3,4	2,0					
0,50 b	30																			
0,50 b	40	7,4			5,6			3,6			2,2									
0,50 b	55	21,5	8,0		15,9	5,8		10,4	3,1		7,9			4,0						
0,50 b	70	24,0	12,5	5,4	20,0	9,5		16,0	5,7		14,0	3,7		6,2						

Tabela H. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 90 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 90 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
$b \text{ (mm)}$		≥ 600			500			400			350			300			250		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5
e_0	$a \text{ (mm)}$	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$		
20 mm	30	12,9	10,4	5,2	10,1	7,8		7,1	4,3		5,5	3,0		3,5			2,2		
20 mm	40	13,6	11,9	8,9	10,5	9,1	6,0	4,7	6,3		5,9	5,1		4,1	1,9		2,8	2,2	
20 mm	55	17,3	13,9	11,9	14,0	10,7	9,1	9,6	7,4	5,9	7,6	5,8	4,3	5,1	4,0	2,0	3,4	3,0	2,4
20 mm	70	24,0	16,6	14,1	20,0	12,6	10,5	11,5	8,4	6,8	8,9	6,5	4,9	5,7	4,3	2,6	3,6	3,1	2,5
0,25 b	30	8,4	5,7		6,4	4,1		4,3	2,5		3,2								
0,25 b	40	13,1	7,9	5,7	9,9	6,0		6,4	3,8		4,9	2,7		2,4					
0,25 b	55	24,0	17,3	9,4	20,0	12,4	6,8	16,0	6,8	4,0	14,0	4,6	2,5	6,8	2,5		3,0	1,9	
0,25 b	70	24,0	24,0	17,3	20,0	20,0	11,3	16,0	16,0	5,4	14,0	14,0	3,6	12,0	3,3		4,6	2,4	
0,50 b	30																		
0,50 b	40	18,6			13,4			8,4			5,9								
0,50 b	55	24,0	24,0		20,0	20,0		16,0	10,7		14,0	6,4		12,0			6,9		
0,50 b	70	24,0	24,0	24,0	20,0	20,0		16,0	16,0		14,0	14,0		12,0			10,0		

Tabela I. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 120 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 120 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			500			450			400			350			300		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,65	0,3	0,45	0,55
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$														
20 mm	35	8,0	5,9		6,1	4,2		5,2	2,9		4,2			3,1					
20 mm	45	8,3	6,8	3,8	6,2	5,2		5,2	3,8		4,3	2,9		3,4	1,8		2,3		
20 mm	60	9,4	7,8	6,2	7,2	5,9	4,5	6,1	4,9	3,1	5,0	3,9	2,1	3,9	2,9	1,8	2,7	2,1	
20 mm	75	10,6	8,7	7,1	7,9	6,5	5,1	6,8	5,3	3,9	5,4	4,3	2,8	4,1	3,1	2,1	2,9	2,2	
0,25 b	35	4,8	3,5		3,6	2,3		2,9			2,2								
0,25 b	45	5,9	4,2		4,5	2,9		3,6	2,2		2,8			2,0					
0,25 b	60	8,8	5,9	4,2	6,5	4,3	2,3	5,5	3,4		4,3	2,5		3,1	1,7		1,8		
0,25 b	75	12,3	7,3	5,4	9,4	5,2	3,3	7,3	4,2	2,1	5,4	3,1		3,8	2,1		2,3		
0,50 b	35																		
0,50 b	45	3,8																	
0,50 b	60	14,0	4,5		10,2			8,3			6,4			4,5					
0,50 b	75	24,0	9,4		20,0	6,4		16,0	4,7		11,3	2,5		7,3			3,2		

Tabela J. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 120 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 120 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			500			450			400			350			300		
μ_{fi}		0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,7	0,3	0,5	0,65	0,3	0,45	0,55
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$		
20 mm	35	11,4	9,2		8,8	6,6		7,4	4,1		5,9	2,6		4,5			2,5		
20 mm	45	11,9	10,4	6,4	9,1	7,8		7,8	5,9		6,3	4,5		4,9	3,0		3,2		
20 mm	60	15,1	12,1	10,1	11,3	9,1	7,4	9,5	7,6	5,6	7,6	6,1	3,8	5,9	4,5	3,0	4,0	3,1	2,2
20 mm	75	17,8	14,1	11,9	14,0	10,5	8,5	11,3	8,5	6,7	8,9	6,8	4,8	6,6	4,9	3,5	4,3	3,3	2,5
0,25 b	35	7,2	4,9		5,4	3,3		4,3			3,1								
0,25 b	45	9,6	6,2		7,0	4,3		5,8	3,3		4,3			3,0					
0,25 b	60	24,0	10,6	7,2	20,0	7,2	4,7	18,0	5,6		16,0	4,0		6,9	2,7		2,7		
0,25 b	75	24,0	24,0	10,1	20,0	20,0	6,4	18,0	10,8	4,8	16,0	5,9		14,0	3,6		4,6	2,1	
0,50 b	35																		
0,50 b	45	9,4			6,0														
0,50 b	60	24,0	13,1		20,0	7,8		18,0			16,0			14,0			3,3		
0,50 b	75	24,0	24,0		20,0	20,0		18,0	18,0		16,0	12,7		14,0			12,0		

Tabela K. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 180 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 180 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			550			500			450			400			350		
μ_{fi}		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,55	0,2	0,3	0,45
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$														
20 mm	40	7,4	5,9		6,5	4,8		5,5	3,9		4,5	2,5		3,6			2,6		
20 mm	50	7,6	6,4	3,5	6,7	5,6	1,7	5,6	4,6		4,7	3,2		3,8	2,1		2,8		
20 mm	65	8,7	7,1	5,2	7,6	6,2	4,3	6,5	5,2	3,3	5,3	4,2		4,3	3,2		3,2	2,5	
20 mm	80	9,9	7,8	6,2	8,7	6,8	5,2	7,4	5,8	4,2	6,1	4,5	3,1	4,7	3,5	2,4	3,5	2,6	
0,1 b	40	6,4	5,2		5,6	4,6		4,8	3,8		3,9	2,2		3,1			2,3		
0,1 b	50	6,9	5,5	3,1	6,0	4,9		5,2	4,0		4,3	3,1		3,5	2,0		2,5		
0,1 b	65	8,3	6,4	4,8	7,1	5,6	4,0	6,2	4,8	3,0	5,1	3,8		4,0	3,0		3,0	2,3	
0,1 b	80	10,0	7,3	5,7	8,7	6,4	4,8	7,4	5,3	3,8	6,0	4,3	2,6	4,6	3,2	2,0	3,4	2,5	
0,20 b	40	5,4	3,8		4,6	3,2		3,8	2,5		3,0	1,6		2,2			1,4		
0,20 b	50	6,1	4,3		5,2	3,7		4,5	2,9		3,5	2,1		2,7			1,8		
0,20 b	65	8,0	5,4	3,8	6,8	4,6	3,0	5,8	3,8	2,3	4,7	2,9		3,6	2,1		2,5		
0,20 b	80	11,6	6,6	5,0	9,7	5,6	4,0	7,9	4,6	3,0	6,2	3,6	1,8	4,6	2,7		3,2		

Tabela L. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 180 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 180 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			550			500			450			400			350		
μ_{fi}		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,55	0,2	0,3	0,45
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$		
20 mm	40	10,6	8,9		9,3	7,3		7,8	5,8		6,5	3,7		5,1	1,8		3,8		
20 mm	50	11,1	9,2	5,4	9,8	7,9	2,7	8,2	6,8		6,9	5,0		5,4	3,3		4,0	2,6	
20 mm	65	13,4	10,4	8,4	11,6	9,1	7,0	9,9	7,6	5,4	8,0	6,1	2,0	6,3	4,8	1,8	4,8	3,8	2,5
20 mm	80	17,3	11,9	9,9	14,7	10,2	8,4	12,2	8,5	6,6	9,6	6,9	4,8	7,4	5,3	3,6	5,3	4,0	3,0
0,1 b	40	9,4	7,4		8,2	6,6		7,0	5,6		5,8	3,3		4,5			3,3		
0,1 b	50	10,4	8,2	4,9	9,1	7,0		7,6	6,0		6,3	4,8		4,9	3,1		3,8	2,5	
0,1 b	65	13,6	9,6	7,9	11,8	8,4	6,6	9,7	7,0	4,9	8,0	5,6		6,1	4,3		4,5	3,3	2,3
0,1 b	80	24,0	11,9	9,4	22,0	10,0	7,9	15,7	8,2	6,2	10,8	6,5	4,3	7,8	4,9	3,1	5,3	3,8	2,7
0,20 b	40	7,9	5,4		6,8	4,5		5,6	3,5		4,5	2,4		3,3			2,0		
0,20 b	50	9,4	6,2		8,2	5,2		6,8	4,1		5,4	3,0		4,0	2,0		2,6		
0,20 b	65	24,0	8,4	6,2	18,1	7,0	5,2	12,0	5,6	3,7	8,5	4,3		5,9	3,0		3,9	2,2	
0,20 b	80	24,0	13,1	7,9	22,0	10,4	6,6	20,0	7,8	5,2	18,0	5,8	3,5	16,0	4,0	2,1	6,4	2,9	2,2

Tabela M. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 240 e $l_{0,fi}=1,0l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 240 \text{ min}$		$l_{0,fi} = 1,0 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			550			500			450			400			350		
μ_{fi}		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,55	0,2	0,3	0,45
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$														
20 mm	40	6,4	3,5		5,6	2,5		4,6	2,5		3,6	2,3		2,7					
20 mm	50	6,6	5,0		5,6	3,8		4,8	3,8		3,8	3,1		2,9	1,7				
20 mm	65	7,1	5,9	2,4	6,2	5,1	2,2	5,2	4,3	2,2	4,2	3,6	2,3	3,1	2,7	1,7	2,2		
20 mm	80	8,0	6,4	4,3	6,8	5,4	4,1	5,8	4,8	3,8	4,7	4,0	3,4	3,6	3,0	2,7	2,4		
0,1 b	40	5,5	2,9		4,8	1,9		3,9	2,2		3,1	2,1		2,3					
0,1 b	50	5,9	4,7		5,1	3,7		4,2	3,5		3,4	2,9		2,5					
0,1 b	65	6,6	5,2	2,1	5,6	4,3	1,7	4,6	3,8	2,0	3,8	3,1	2,1	2,8	2,3		1,9		
0,1 b	80	7,6	5,9	4,0	6,5	4,9	3,7	5,5	4,3	3,2	4,4	3,6	3,1	3,2	2,7	2,4	2,2		
0,20 b	40	4,0			3,2			2,5			1,7								
0,20 b	50	4,7	3,1		4,0	2,5		3,2	2,0		2,3								
0,20 b	65	5,5	3,6		4,8	3,0		3,9	2,5		2,9	2,1		2,0					
0,20 b	80	7,3	4,7	2,9	6,2	3,8	2,9	5,1	3,3	2,5	3,9	2,9	2,2	2,7	1,8				

Tabela N. Comprimento efetivo máximo, $l_{0,max}$, para estruturas contraventadas e não contraventadas com um resistência ao fogo igual a 240 e $l_{0,fi}=0,7l_0$.

Retirado de CEN (2020).

$R_{fi} = 240 \text{ min}$		$l_{0,fi} \leq 0,7 l_0$			$0,1 < \omega < 1,0$														
b (mm)		≥ 600			550			500			450			400			350		
μ_{fi}		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,55	0,2	0,35	0,5	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,35	0,2	0,25	0,3
e_0	a (mm)	$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$			$l_{0,max} \text{ (m)}$		
20 mm	40	9,2	5,2		7,7	3,6		6,4	3,7		5,2	3,5		3,8			2,5		
20 mm	50	9,4	7,7		8,2	5,9		6,8	5,6		5,4	4,6		4,1	2,6		2,7	1,7	
20 mm	65	10,4	8,4	4,2	8,8	7,3	3,6	7,4	6,2	3,5	5,9	5,2	3,5	4,5	3,8	2,6	3,0	2,7	1,6
20 mm	80	12,1	9,4	7,2	10,4	7,9	6,6	8,7	7,0	5,6	6,9	5,8	5,0	5,1	4,3	4,0	3,5	3,2	2,7
0,1 b	40	7,9	4,5		6,6	2,9		5,6	3,1		4,3	3,0		3,1			2,0		
0,1 b	50	8,4	6,7		7,3	5,7		6,0	4,9		4,8	4,1		3,5	2,5		2,3		
0,1 b	65	9,6	7,4	3,2	8,2	6,4	2,9	6,8	5,4	3,1	5,4	4,5	3,3	4,0	3,3	2,5	2,7	2,3	
0,1 b	80	12,4	8,7	6,4	10,4	7,3	5,9	8,5	6,4	4,9	6,5	5,4	4,6	4,8	3,8	3,5	3,2	2,7	2,5
0,20 b	40	5,7			4,5			3,5			2,2								
0,20 b	50	6,9	4,5		5,7	3,4		4,5	2,9		3,3	2,2		2,0					
0,20 b	65	8,7	5,4		7,3	4,3		5,0	3,7		4,3	3,0		2,8					
0,20 b	80	24,0	7,2	4,9	12,7	5,9	4,3	9,1	5,2	3,5	6,5	4,3	3,2	4,1	2,6	2,1	2,3		