



INTEGRAÇÃO DO CÁLCULO ESTRUTURAL AO FOGO EM PROJETO ATRAVÉS DE UMA FERRAMENTA BIM

BRUNO MIGUEL SOUSA DA SILVA

setembro de 2016

INTEGRAÇÃO DO CÁLCULO ESTRUTURAL AO FOGO EM PROJETO ATRAVÉS DE UMA FERRAMENTA BIM

Bruno Miguel Sousa Silva – 1050211

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: Engenheiro Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Supervisor: Engenheiro Adriano Alves de Sousa da Costa Lopes (SE2P)

SETEMBRO DE 2016

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de Texto	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xviii
1 Introdução.....	1
2 Incêndio em estruturas metálicas e mistas	5
3 Aspectos regulamentares de estruturas em situação de incêndio segundo os eurocódigos	21
4 Análise estrutural pelo modelo simplificado	41
5 Ferramentas de cálculo com integração BIM	67
6 Desenvolvimento de um processo automático de projeto de estruturas metálicas.....	75
7 Desenvolvimento de um processo automático de projeto de vigas mistas	93
8 Caso de estudo.....	105
9 Conclusões e desenvolvimentos futuros	137
Bibliografia.....	139

RESUMO

Este trabalho é o resultado do estágio curricular realizado na empresa “SE2P Sociedade de Engenharia, Projetos e Planeamento”, em contexto profissional. A empresa presta vários serviços de engenharia, destaca-se no entanto a forte apetência para o projeto de estruturas de aço. O estágio incidiu na temática da ação do fogo em estruturas metálicas e mistas, sendo desenvolvidas ferramentas de cálculo estrutural em situação de incêndio, integradas numa metodologia de trabalho que segue os princípios inerentes à tecnologia BIM (Building Information Modeling).

Todos os cálculos e verificações foram então realizados e justificados segundo os Eurocódigos ou autores de reconhecido mérito na área de estudo do fogo em estruturas.

É efetuada uma introdução geral ao fenómeno do fogo e às medidas mais correntes de proteção, indicando-se os documentos normativos aplicáveis tanto ao cálculo estrutural como aos materiais de proteção.

No âmbito do trabalho foram desenvolvidas ferramentas de apoio ao projeto que permitem a determinação de espessuras de proteção passiva para estruturas metálicas e vigas mistas, tendo sido realizada a sua aplicação a um caso de estudo baseado num edifício de habitação. Este caso de estudo serviu também para criar cenários de otimização utilizando-se referências de preços de mercado para o aço, sua transformação em fábrica e sistemas de proteção passiva, demonstrando-se a dificuldade em encontrar caminhos rápidos e diretos de decisão no processo de otimização.

ABSTRACT

This work is the result of internship held in the company "SE2P Engineering Society, Projects and Planning," in a professional context. The company provides various engineering services, stands out however the strong appetite for steel structures design. The internship focused on fire action theme in steel and composite structures, being developed structural calculation tools in fire, integrated into a working methodology that follows the principles inherent in the BIM (Building Information Modeling).

All calculations and checks are made and justified according to Eurocodes or authors of recognized merit in the study area of fire in structures.

Introduction is made to the phenomenon of fire and the most common measures of protection are presented, pointing out the normative documents applicable to both the structural design and the protective materials.

Within the work support tools were developed for the project to enable the determination of passive protection thicknesses for steel and composite beams structures, which were applied to a case study based on a residential building. This case study also served to create optimization scenarios using reference market price for steel, processing factory and passive protection systems, demonstrating the difficulty in finding quick and direct paths in the optimization process.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Calendarização.....	2
1.4	Organização do relatório.....	3
2	Incêndio em estruturas metálicas e mistas.....	5
2.1	Considerações gerais.....	5
2.2	Documentos normativos.....	6
2.2.1	Eurocódigos estruturais.....	6
2.2.2	Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios.....	7
2.3	O fenómeno do fogo.....	8
2.3.1	Evolução de um incêndio.....	8
2.4	Propagação do calor.....	10
2.5	Medidas de proteção.....	12
2.5.1	Proteção passiva.....	13
3	Aspetos regulamentares de estruturas em situação de incêndio segundo os eurocódigos.....	21
3.1	Comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo.....	21
3.2	Ações e combinações de ações em situações de incêndio.....	23
3.3	Representação da ação térmica por curvas de incêndio.....	24
3.3.1	Curva de incêndio padrão (ISO 834).....	25
3.3.2	Curva de incêndio para elementos exteriores.....	26
3.3.3	Curva de Incêndio de Hidrocarbonetos.....	26
3.4	Propriedades mecânicas do aço estrutural a temperatura elevada.....	27
3.5	Desenvolvimento da temperatura em Elementos Metálicos.....	28

3.5.1	Elementos sem material de proteção.....	28
3.5.2	Elementos com material de proteção	35
3.6	Desenvolvimento da temperatura em vigas mistas	36
3.6.1	Perfil metálico sem proteção.....	38
3.6.2	Perfil metálico com proteção	38
3.6.3	Laje de betão	38
3.6.4	Conectores e armaduras	40
4	Análise estrutural pelo modelo simplificado	41
4.1	Estruturas metálicas.....	41
4.1.1	Classificação das secções.....	41
4.1.2	Análise no domínio da resistência.....	42
4.1.3	Análise no domínio da temperatura.....	44
4.2	Vigas mistas.....	45
4.2.1	Classe da secção e largura efetiva	46
4.2.2	Resistência ao corte dos conectores	46
4.2.3	Efeito da conexão parcial.....	50
4.2.4	Resistência da secção ao esforço transversal.....	53
4.2.5	Resistência da secção à flexão.....	54
4.2.6	Resistência da secção à flexão com interação do esforço transversal.....	62
4.2.7	Resistência à encurvadura por esforço transversal.....	63
5	Ferramentas de cálculo com integração BIM.....	67
5.1	Conceito de modelos de informação dos edifícios (BIM)	67
5.2	Objetivos das ferramentas de cálculo.....	69
5.3	Programas informáticos utilizados.....	70
5.3.1	Programa <i>EXCEL</i>	70
5.3.2	Programa <i>REVIT</i>	71

5.3.3	Programa Autodesk <i>Robot Structural Analysis</i>	72
6	Desenvolvimento de um processo automático de projeto de estruturas metálicas.....	75
6.1	Introdução.....	75
6.2	Personalização do programa <i>revit</i>	76
6.3	Apresentação do Fire Protection Analysis – Steel Elements	80
6.4	Validação do fire protection analysis – steel elements	87
7	Desenvolvimento de um processo automático de projeto de vigas mistas	93
7.1	Introdução.....	93
7.2	Interação entre os programas <i>revit</i> , <i>excel</i> e <i>ABC</i>	94
7.3	Personalização do programa <i>revit</i>	95
7.4	Apresentação do fire protection analysis – composite beams.....	98
7.5	Limitações do programa fire protection analysis – composite beams.....	103
8	Caso de estudo.....	105
8.1	Arquitetura.....	105
8.2	Conceção estrutural.....	106
8.3	Modelação numérica	108
8.4	Análise e dimensionamento estrutural em condições normais de temperatura.....	110
8.4.1	Ações	110
8.4.2	Combinação de ações a temperatura normal	114
8.4.3	Dimensionamento em condições normais de temperatura	115
8.5	Análise e dimensionamento estrutural em situação de incêndio	122
8.5.1	Ações e combinação de ações em situação de incêndio.....	123
8.5.2	Determinação de proteções para as vigas mistas	124
8.5.3	Determinação de proteções para os pilares e contraventamentos.....	131
8.6	Análise económica	133
9	Conclusões e desenvolvimentos futuros	137

9.1	Conclusões finais.....	137
9.2	Desenvolvimentos futuros.....	138
	Bibliografia.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cronograma das atividades desenvolvidas no estágio curricular	2
Figura 2.1 – Tetraedro do Fogo (Oswaldo (2009))	8
Figura 2.2 - Fases de desenvolvimento de um incêndio (Inácio (2011)).....	9
Figura 2.3 - Diferentes processos de transmissão de calor (Inácio (2011))	10
Figura 2.4 - Comportamento expansivo da tinta intumescente em caso de incêndio (Mesquita et al. (2010)).....	14
Figura 2.5 - Esquema de pintura de proteção (adaptado de Pannoni (2012)).....	16
Figura 2.6 - Proteção no contorno do perfil metálico	16
Figura 2.7 – A estrutura metálica do Aeroporto Sá Carneiro é protegida com recurso a tintas intumescentes (SP Project (2007)).....	17
Figura 2.8 - Proteção através de materiais projetados	18
Figura 2.9 – Placa de gesso cartonado hidrófugo (JMC (2016)).....	19
Figura 2.10 – Proteção por placas em caixão.....	19
Figura 2.11 – Placas de lã de rocha (Rentec, 2010).....	20
Figura 3.1 - Métodos de cálculo constantes da EN 1991-1-2 para verificação da resistência ao fogo (adaptado da EN 1991-1-2 (2010)).....	22
Figura 3.2 - Representação gráfica das curvas padrão, de elementos exteriores e de fogo com hidrocarbonetos.....	25
Figura 3.3 – Comparação da evolução da temperatura entre as fases de um incêndio natural e do incêndio padrão (Pannoni (2012))	25
Figura 3.4 – Fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço carbono a temperaturas elevadas	28
Figura 3.5 - Efeito de sombreamento na exposição ao fogo (Gavina (2013)).....	31
Figura 3.6 - Variação do calor específico do aço com a temperatura.....	34
Figura 3.7 - Representação gráfica do tempo de atraso (Franssen e Vila Real (2010))	36

Figura 3.8 – Tipologias de secções transversais de vigas mistas abrangidas pelos modelos de cálculo simplificado (EN 1994-1-2 (2008)).....	37
Figura 3.9 - Divisão da secção transversal dos perfis metálicos segundo a EN 1994-1-2 (2008)	37
Figura 4.1 - Distribuição de tensões nos conectores (adaptado de Salvado Ferreira (2012))	48
Figura 4.2 - Parâmetros geométricos para a determinação do coeficiente de redução da resistência dos conectores para nervuras perpendiculares à viga mista (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))	49
Figura 4.3 - Parâmetros geométricos para determinação do coeficiente de redução da resistência dos conectores para nervuras paralelas à viga (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))	49
Figura 4.4 - Equilíbrio de forças em vigas mistas segundo o cálculo orgânico e pela teoria da plasticidade	50
Figura 4.5 - Variação da capacidade resistente de uma viga mista em função do grau de conexão (adaptado da EN 1994-1-1 (2009)).....	51
Figura 4.6 - Exemplo de equilíbrio de forças em vigas mistas com conexão parcial segundo o cálculo orgânico e pela teoria da plasticidade	52
Figura 4.7 - Parâmetros a substituir nas expressões de cálculo da EN 1994-1-1 (2009) referentes ao esforço transversal para a situação de incêndio.....	53
Figura 4.8 - Distribuição de tensões numa viga mista em condições de temperatura ambiente com perfil metálico do tipo PRS	54
Figura 4.9 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio.....	55
Figura 4.10 - Esquema de uma viga mista com identificação dos parâmetros mais relevantes para o cálculo da resistência a momentos positivos.....	56
Figura 4.11 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio aplicando os princípios da teoria da plasticidade e segundo o método de cálculo simplificado admitindo o eixo neutro localizado na alma do perfil	58
Figura 4.12 - Esquema genérico de uma viga mista com identificação dos parâmetros mais relevantes para o cálculo da resistência a momentos negativos por aplicação da teoria da plasticidade	60
Figura 4.13 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio aplicando os princípios da teoria da plasticidade e segundo o método de cálculo simplificado, admitindo o eixo neutro localizado na alma do perfil	61

Figura 4.14 - Redução da tensão resistente do aço na alma na capacidade resistente da alma quando é considerada a interação entre o momento fletor e o esforço transversal (adaptado da EN 1994-1-1 (2009)).....	63
Figura 4.15 - Reforços na alma de perfil metálico para aumento da resistência à encurvadura por esforço transversal (Gavina (2013)).....	64
Figura 4.16 - Resistência à flexão de um perfil metálico considerando: a) a totalidade da secção; b) apenas os banzos	66
Figura 5.1 - Vantagens da metodologia BIM	67
Figura 5.2 - Representação dos Outputs de um modelo BIM	68
Figura 5.3 - Conceito BIM resulta da interoperabilidade de <i>software</i>	70
Figura 5.4 - Interface gráfico do VBA.....	71
Figura 5.5 - Interface gráfica do REVIT	71
Figura 5.6 – Interface gráfica do ARSA	72
Figura 6.1 - Sequência de procedimentos na elaboração de um projeto	75
Figura 6.2 - Tabela <i>Properties</i> apresentada no <i>Revit</i> para um pilar	77
Figura 6.3 - Pormenor do grupo de parâmetros <i>Fire Protection</i>	77
Figura 6.4 - <i>Schedules</i> relativos aos pilares e vigas a proteger à ação do fogo.....	79
Figura 6.5 - <i>Schedule</i> “Protecção ao fogo em pilares metálicos”	79
Figura 6.6 – Início do programa <i>FirePro-Steel</i>	81
Figura 6.7 - Assistente do <i>FirePro-Steel</i>	81
Figura 6.8 - Interface gráfico do separador Dados_REVIT	82
Figura 6.9 - Pormenor da zona 1 da folha de Excel	82
Figura 6.10 - Pormenor da zona 2	83
Figura 6.11 - Separador Propriedades_Material_Protecção.....	84
Figura 6.12 - Separador <i>Steelguard</i> 562-EN13381-4.....	85
Figura 6.13 - Pormenor do separador <i>Steelguard</i> 562-EN13381-4.....	85
Figura 6.14 - Determinação da temperatura do aço sem protecção.....	86

Figura 6.15 - Determinação da espessura mínima de proteção.....	86
Figura 6.16 - Opção de gerar gráficos.....	87
Figura 7.1 – Interface gráfico de apresentação do <i>FirePro - Composite Beams</i>	93
Figura 7.2 – Fluxos de informação entre os programas intervenientes no processo de dimensionamento de vigas mistas	94
Figura 7.3 – <i>Schedules</i> e parâmetros de instância referentes às vigas mistas.....	96
Figura 7.4 – Pormenor do <i>schedule</i> de proteção ao fogo em vigas mistas (vigas e conectores).....	96
Figura 7.5 – Zona 1 relativa aos dados geométricos dos perfis metálicos.....	97
Figura 7.6 – Zonas 2 e 3 - tensão de cedência do aço e dados da conexão	97
Figura 7.7 – <i>Schedule</i> para repositório das lajes de betão	98
Figura 7.8 – Interface gráfica da base de dados do <i>Revit</i> para materiais.....	98
Figura 7.9 – Interface gráfico da folha <i>Dados_REVIT_Vigas</i>	99
Figura 7.10 – Pormenor das colunas da área 2 respeitante à seleção das lajes e chapas	99
Figura 7.11 – Pormenor das restantes colunas da área 2	100
Figura 7.12 – Folhas com os fatores de redução.....	101
Figura 7.13 – Separador com o desenvolvimento da temperatura no betão	101
Figura 7.14 – Cálculo das espessuras de proteção e opções do relatório.....	102
Figura 7.15 – Organização do relatório	102
Figura 7.16 – Interface gráfico de relatório.....	103
Figura 8.1 – Planta do piso tipo do edifício	105
Figura 8.2 – Corte do edifício.....	106
Figura 8.3 – Planta estrutural do edifício	106
Figura 8.4 – Alçado estrutural da fachada frontal e traseira.....	107
Figura 8.5 – Alçado estrutural das laterais	107
Figura 8.6 – Modelação da estrutura em <i>Revit</i>	108
Figura 8.7 - Modelação da estrutura em <i>ARSA</i>	108

Figura 8.8 – Modelo de cálculo do ARSA.....	109
Figura 8.9 – Pressões dinâmicas do vento nas fachadas e cobertura do edifício nas diferentes zonas previstas na norma.....	113
Figura 8.10 – Combinações de realizadas no ARSA.....	114
Figura 8.11 – Características geométricas da laje mista H60 x 0,70 x 120.....	116
Figura 8.12 – Situações de carga a que as vigas secundárias e principais estão sujeitas	117
Figura 8.13 – Perfis das vigas mistas obtidos para os pisos	118
Figura 8.14 - Perfis das vigas mistas obtidos para a cobertura	118
Figura 8.15 – Definição de parâmetros de cálculo para os perfis metálicos no ARSA	121
Figura 8.16 – Seções obtidas para os pilares.....	121
Figura 8.17 – Seções em perfis CHS obtidas para os contraventamentos	122
Figura 8.18 – Combinação de ações geradas no ARSA para dimensionamento dos pilares e contraventamentos.....	124
Figura 8.19 – <i>Schedules</i> do Revit exportados para o <i>FirePro-CompositeBeams</i>	125
Figura 8.20 – Pormenor do relatório de cálculo de uma viga	128
Figura 8.21 – Excerto da tabela da tinta Hempacore One	128
Figura 8.22 – Seções obtidas para as vigas dos pisos.....	130
Figura 8.23 – Seções CHS obtidas para os contraventamentos	133
Figura 8.24 – Comparação de custos entre os sistemas de proteção tinta e argamassa (cenário I)	134
Figura 8.25 - Comparação de custos entre os sistemas de proteção tinta e argamassa (cenário II)	135
Figura 8.26 - Comparação de custos de estruturas sem proteção e dotado de sistemas de proteção com tinta e argamassa	135

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Lista de Eurocódigos publicados	6
Tabela 2.2 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios	7
Tabela 3.1 - Fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2 (2010))	27
Tabela 3.2 - Fatores de massividade para diferentes secções (adaptado de Lennon et al. (2007))	30
Tabela 3.3 - Fatores de massividade para diferentes sistemas de proteção passiva ao fogo (adaptado de Lennon et al. (2007))	31
Tabela 3.4 - Valores do coeficiente de transferência de calor por convecção.....	33
Tabela 3.5 - Distribuição da temperatura do betão em função do afastamento da superfície exposta ao fogo padrão (Gavina (2013))	39
Tabela 4.1 - Verificações de segurança em estruturas metálicas não contempladas na EN 1993-1-1 (2009) para situações de incêndio	44
Tabela 4.2- Verificações de segurança a efetuar em vigas mistas constituídas por perfil metálico sem revestimento de betão segundo a EN 1994-1-2	45
Tabela 4.3- Limites para os coeficientes de redução da resistência dos conectores com nervuras perpendiculares às vigas (adaptado da EN 1994-1-1 (2009)).	49
Tabela 4.4 - Valores do coeficiente χ_w de acordo com a EN 1993-1-5 (2006).....	65
Tabela 6.1 – Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 3 lados a fogo simulado pela curva ISO 834.....	88
Tabela 6.2 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 4 lados a fogo simulado pela curva ISO 834.....	88
Tabela 6.3 - Comparação realizada com proteção em caixão e perfil exposto em 3 lados a fogo simulado pela curva ISO 834.....	89
Tabela 6.4 - Comparação realizada com proteção em caixão e perfil exposto em 4 lados a fogo simulado pela curva ISO 834.....	89

Tabela 6.5 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 3 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos.....	90
Tabela 6.6 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 4 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos.....	90
Tabela 6.7 - Comparação realizada com proteção em caixão com perfil exposto em 3 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos.....	91
Tabela 8.1 – Ações permanentes consideradas no dimensionamento a temperatura ambiente.....	110
Tabela 8.2 – Restantes cargas permanentes consideradas no dimensionamento a temperatura ambiente	111
Tabela 8.3 – Valores da distribuição de temperatura segundo a componente de variação uniforme ΔT_u	112
Tabela 8.4 - Valores da distribuição de temperatura segundo as componentes diferenciais ΔT_{Mz} e ΔT_{My}	112
Tabela 8.5 - Dados utilizados para determinação do espectro de resposta de cálculo	114
Tabela 8.6 – Propriedades mecânicas da laje mista H60 x 0,70 x 120	116
Tabela 8.7 – Resultados referentes à conexão das vigas principais dos pisos, em condições normais de temperatura	119
Tabela 8.8 - Resultados referentes à conexão das vigas secundárias dos pisos, em condições normais de temperatura	119
Tabela 8.9 – Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas principais dos pisos em condições normais de temperatura	119
Tabela 8.10 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas secundárias dos pisos em condições normais de temperatura	120
Tabela 8.11 – Ações consideradas no dimensionamento da estrutura em situação de incêndio.....	123
Tabela 8.12 - Resultados referentes à conexão das vigas principais dos pisos, à temperatura ambiente com condições de fogo	125
Tabela 8.13 - Resultados referentes à conexão das vigas secundárias dos pisos, à temperatura ambiente com condições de fogo	126

Tabela 8.14 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas principais dos pisos à temperatura ambiente em condições de fogo	126
Tabela 8.15 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas secundárias dos pisos à temperatura ambiente em condições de fogo	126
Tabela 8.16 – Necessidades de proteção passiva ao fogo para as vigas dos pisos (1ª iteração)	127
Tabela 8.17 - Necessidades de proteção passiva ao fogo para as vigas dos pisos (2ª iteração).....	129
Tabela 8.18 - Necessidades de proteção passiva ao fogo para as vigas dos pisos (3ª iteração).....	130
Tabela 8.19 – Necessidades de proteção passiva para os pilares e contraventamentos (1ª iteração) ...	131
Tabela 8.20 – Necessidades de proteção passiva para os pilares e contraventamentos (2ª iteração) ...	132
Tabela 8.21 – Custos unitários adotados para o aço em perfil e processos inerentes à produção	133
Tabela 8.22 – Custos unitários adotados para os sistemas de proteção tinta intumescente e argamassa	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Este trabalho é o resultado do estágio curricular realizado na empresa “SE2P Sociedade de Engenharia, Projetos e Planeamento”, em contexto profissional. A empresa presta vários serviços de engenharia, destacando no entanto a forte apetência para o projeto de estruturas de aço, procurando através da experiência e otimização, tornar a utilização deste material uma alternativa cada vez mais viável à tradicional construção em betão armado. O estágio decorreu sob a supervisão do Eng.º Adriano Lopes, diretor-geral da empresa, que propôs a sua realização sobre a temática da ação do fogo em estruturas metálicas e mistas.

O tema foi considerado como muito interessante, pertinente e enriquecedor por parte do estagiário, uma vez que a construção com recurso ao aço apresenta-se como imprescindível nas construções de grande envergadura, como edifícios comerciais, edifícios altos, armazéns, entre outros. Este material empresta uma maior liberdade no projeto de arquitetura, uma maior flexibilidade, menor prazo de execução, uma grande racionalização de materiais devido ao sistema industrializado de produção, e até um reaproveitamento de materiais uma vez que é reciclável.

1.2 OBJETIVOS

Pretende-se que o estagiário elaborasse a integração do cálculo estrutural ao fogo em projeto, com recurso a ferramentas BIM. As ferramentas criadas deverão permitir, de forma expedita, a determinação de espessuras de materiais de proteção passiva contra incêndio, permitindo criar diferentes cenários de esquemas de proteção e respetivos custos, otimizando deste modo a solução e aumentando a competitividade da empresa.

As ferramentas BIM usadas foram as que a empresa tem utilizado na execução de projeto, nomeadamente o Revit e o Robot Structural Analysis (ARSA), ambas da Autodesk, e o Excel, para criação das folhas de cálculo, onde se processa o cálculo das proteções com recurso a programação em VBA.

Procurou-se ainda obter a melhor complementaridade possível entre estes programas, de modo a respeitar o conceito BIM, e assim simplificar e acelerar ao máximo todo o processo. Em capítulo próprio são devidamente apresentadas as interligações entre os diferentes programas e como estes se complementam.

A forte internalização da SE2P obriga a que sejam utilizadas ferramentas à luz das Normas mais atuais e tecnicamente mais adequadas. Desta forma todos os cálculos e verificações são realizados e justificados segundo os Eurocódigos ou autores de reconhecido mérito na área de estudo do fogo em estruturas. Esta ação prende-se com o facto de os Eurocódigos serem atualmente documentos de referência, servindo de base ao projeto de estruturas, não só no espaço Europeu, mas também um pouco por todo o mundo.

1.3 CALENDARIZAÇÃO

O estágio curricular teve a duração de 24 semanas e obedeceu ao cronograma apresentado na Figura 1.1.

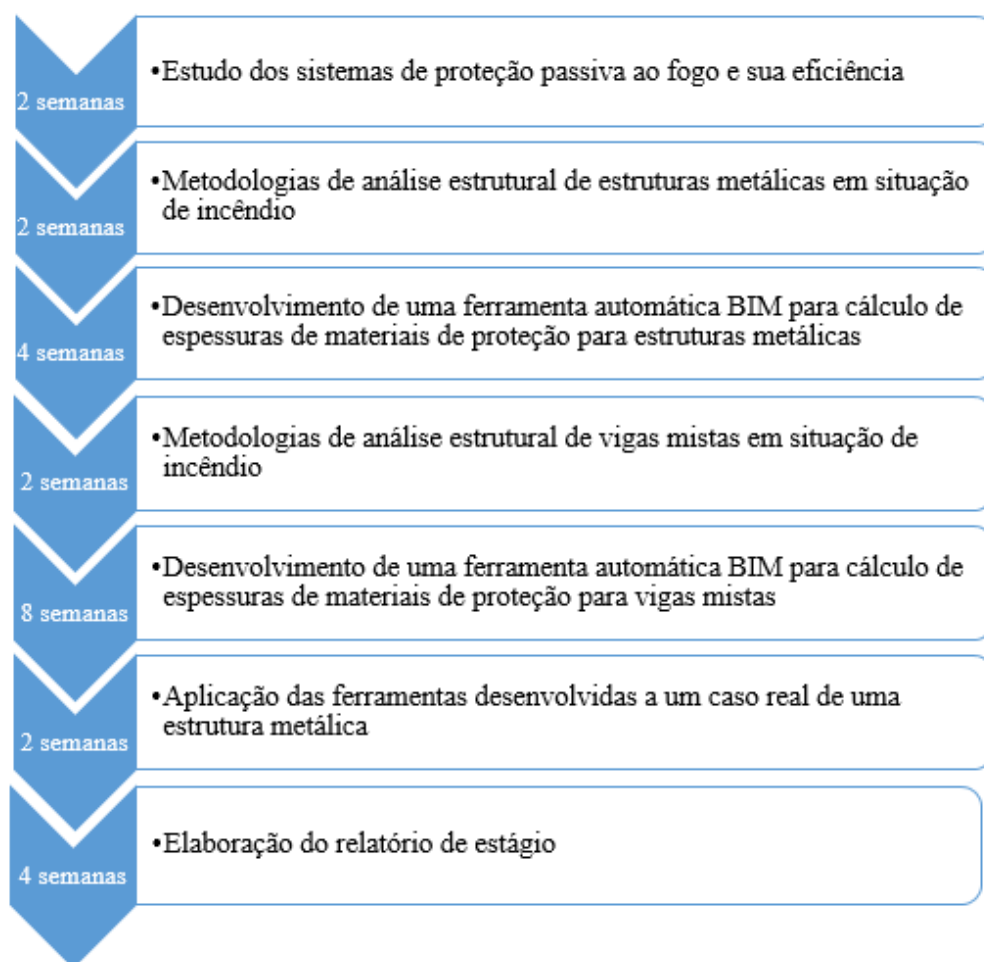


Figura 1.1 – Cronograma das atividades desenvolvidas no estágio curricular

1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O relatório está organizado em 8 capítulos, sendo que no capítulo 2 é realizada uma introdução ao incêndio em estruturas metálicas e mistas, e contém considerações gerais sobre a ação do fogo e materiais de proteção.

No capítulo 3 são apresentados os aspetos regulamentares de análise estrutural em situação de incêndio segundo os Eurocódigos, os correspondentes métodos de cálculo e o comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo, assim como as ações e combinações de ações a atender neste evento, as curvas de incêndio, as propriedades do aço estrutural, e o desenvolvimento da temperatura no aço e no betão.

No capítulo 4 apresentam-se os princípios da análise estrutural pelo modelo simplificado, descrevendo as verificações de segurança necessárias para garantir a segurança dos elementos.

No capítulo 5 é descrito o conceito de integração BIM, assim como os programas utilizados para o desenvolvimento das ferramentas de projeto de estruturas metálicas e vigas mistas, apresentadas nos capítulos 6 e 7, respetivamente.

No capítulo 8 é apresentado o caso de estudo, utilizando-se as ferramentas desenvolvidas para a determinação de proteções para os elementos metálicos e vigas mistas num edifício habitacional de 5 pisos localizado no Porto.

O capítulo 9 contém as conclusões e os desenvolvimentos futuros.

2 INCÊNDIO EM ESTRUTURAS METÁLICAS E MISTAS

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O dimensionamento estrutural ao fogo baseia-se no facto de que as altas temperaturas decorrentes de um incêndio reduzem a resistência mecânica, a rigidez dos elementos estruturais da edificação e promovem expansões térmicas diferenciais, podendo originar o colapso da estrutura. Quando num edifício deflagra um incêndio, a sua ação faz-se sentir diretamente nos elementos estruturais do compartimento onde este ocorre, e indiretamente, em zonas mais ou menos afastadas deste. Ao estado de tensão a que a estrutura está sujeita no início do incêndio, é adicionado um novo estado de tensão ao longo do incêndio devido ao aquecimento diferencial a que ficam sujeitos os elementos estruturais. Este estado de tensão propaga-se pela estrutura devido à maior ou menor continuidade entre os elementos que a constituem, originando um novo estado de deformação global, que se agrava com o tempo de duração do incêndio. Para além disso, as propriedades dos materiais degradam-se, e mesmo que o estado de tensão permaneça constante, os elementos estruturais terão a sua capacidade resistente diminuída com o tempo. Devido ao fenómeno de migração de esforços, o elemento que colapsa pode não estar diretamente exposto ao fogo, mas encontrar-se mais ou menos afastado, e entrar em rutura devido às cargas adicionais que migram para a sua área de influência (adaptado de Pannoni (2012)).

Os materiais correntes mais usados na estrutura das construções são o betão armado e o aço, tendo estes comportamentos perante o fogo muito distintos. O betão armado tem uma grande capacidade de absorção de calor, por isso os cuidados a ter prendem-se principalmente com um adequado recobrimento das armaduras, sendo suficiente para respeitar as resistências mínimas. As estruturas realizadas em aço são mais problemáticas, porque este material vê alteradas rapidamente as suas propriedades na presença de temperaturas elevadas, nomeadamente o seu módulo de elasticidade e a sua tensão de cedência. É então necessário aumentar o tempo de início da deformação das estruturas e assim conferir mais segurança à construção.

Para o aumento do tempo de resistência ao fogo recorre-se, muitas vezes, à aplicação de materiais isolantes sobre a superfície dos elementos estruturais. Estes tipos de proteção são designados como medidas de proteção passiva.

A utilização de sistemas de proteção contra incêndio nas estruturas metálicas e mistas onera a obra em cerca de 10 a 30% o custo total da estrutura, pelo que reduz a sua competitividade face às estruturas em betão armado. Este facto obriga a uma análise económica da estrutura de aço muito rigorosa e a

realização de um trabalho de projeto muito sério e otimizado, de modo a conseguir concorrer com as estruturas de betão armado (adaptado de Pannoni (2012)).

2.2 DOCUMENTOS NORMATIVOS

Os documentos normativos de maior relevo que foram utilizados na elaboração deste trabalho foram os Eurocódigos e o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE).

2.2.1 Eurocódigos estruturais

Os Eurocódigos estruturais foram desenvolvidos pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) em parceria com a Comissão Europeia. Constituem um conjunto coordenado de normas que visam harmonizar os critérios e métodos de projeto estabelecendo desse modo uma base de entendimento comum entre donos de obra, projetistas, empreiteiros e fabricantes de materiais. Facilita a colocação no mercado de componentes estruturais, materiais e produtos para a construção, aumentando a competitividade internacional europeia e estabelece uma base comum para investigação e desenvolvimento no setor, assim como o desenvolvimento de ferramentas de projeto (adaptado de Vila Real (2012)).

Os Eurocódigos estão divididos em dez volumes, que são os descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Lista de Eurocódigos publicados

Norma	Eurocódigo	Nº de partes
EN 1990	Eurocódigo 0 relativo às bases para o projeto de estruturas	1
EN 1991	Eurocódigo 1 relativo às ações em estruturas	10
EN 1992	Eurocódigo 2 relativo ao projeto de estruturas de betão	4
EN 1993	Eurocódigo 3 relativo ao projeto de estruturas de aço	20
EN 1994	Eurocódigo 4 relativo ao projeto de estruturas mistas aço-betão	3
EN 1995	Eurocódigo 5 relativo ao projeto de estruturas de madeira	3
EN 1996	Eurocódigo 6 relativo ao projeto de estruturas de alvenaria	4
EN 1997	Eurocódigo 7 relativo ao projeto geotécnico	2
EN 1998	Eurocódigo 8 relativo ao projeto de estruturas para resistência aos sismos	6
EN 1999	Eurocódigo 9 relativo ao projeto de estruturas de alumínio	5

Cada País tem a sua versão dos Eurocódigos e os seus respetivos Anexos Nacionais, onde são indicados alguns elementos que os Eurocódigos não especificam, de forma a que cada País adapte a norma à sua realidade.

Para este trabalho foi sobretudo importante o estudo dos Eurocódigos que caracterizam a ação do fogo nas estruturas, sendo eles o EN 1991-1-2 (caracteriza a ação do fogo), EN 1992-1-2 (ação do fogo em estruturas de betão armado), EN 1993-1-2 (ação do fogo em estruturas de aço), EN 1994-1-2 (ação do fogo em estruturas mistas).

Nestes Eurocódigos a resistência ao fogo é definida como a “*capacidade de uma estrutura, de parte de uma estrutura ou de um elemento estrutural para desempenhar as funções pretendidas (função de suporte de cargas e/ou função de compartimentação) para um nível de carga específico, quando sujeita a uma situação de incêndio específica e durante um período de tempo especificado*”. Para os elementos estruturais em que se exige unicamente a resistência estrutural, é referido que essa função é satisfeita, quando a integridade do edificado se mantém durante o tempo requerido de resistência ao fogo, tempo esse que no caso de Portugal é definido no Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios.

2.2.2 Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios

O Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios (SCIE) vigente em Portugal, refere que os elementos estruturais de edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanqueidade durante todas as fases de combate ao incêndio. De forma complementar a Tabela 2.2 apresenta as resistências mínimas ao fogo padrão de elementos estruturais do edifício (ISO 834), em função das utilizações-tipo e das categorias de risco.

Tabela 2.2 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1ª	2ª	3ª	4ª	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R30	R 60	R 90	R 120	Apenas suporte
	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	Suporte e compartimentação
II, XI e XII	R 60	R 90	R 120	R 180	Apenas suporte
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte e compartimentação

A utilização-tipo é definida pela função a que o edifício se destina (ex.: tipo I – habitacionais, tipo II – estacionamentos, etc.), e a categoria de risco é definida para cada utilização-tipo em função da sua altura, número de pisos e efetivo de ocupantes.

2.3 O FENÓMENO DO FOGO

2.3.1 Evolução de um incêndio

O fogo é uma reação físico-química entre um combustível, um comburente (oxigênio), e energia de ativação. Esta reação química é caracterizada por ser exotérmica de onde deriva uma intensa libertação de calor, em geral manifestado por chamas, emissão de fumos e variados gases, entre os quais vapor de água e dióxido de carbono (Inácio (2011)).

A fonte de ignição provoca a decomposição química do material combustível (pirólise), libertando gases combustíveis que reagem exotermicamente com o oxigênio. O calor libertado pela reação exotérmica causa a pirólise dos demais materiais combustíveis, originando uma reação em cadeia de forma descontrolada, até que uma das condições essenciais para que o fogo ocorra se extinga. Esta combinação que origina um incêndio é representada de forma corrente pelo tetraedro do fogo, ilustrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Tetraedro do Fogo (Oswaldo (2009))

A grande maioria dos incêndios segue um padrão qualitativo, que pode ser traduzido por cinco fases perfeitamente identificáveis, em função do tempo decorrido. No entanto, quantitativamente existe uma enorme variabilidade pois o incêndio depende de diversos parâmetros.

As cinco fases referidas são a ignição, a propagação, o *flashover* (inflamação generalizada), a combustão contínua, e o declínio, estando representadas na Figura 2.2.

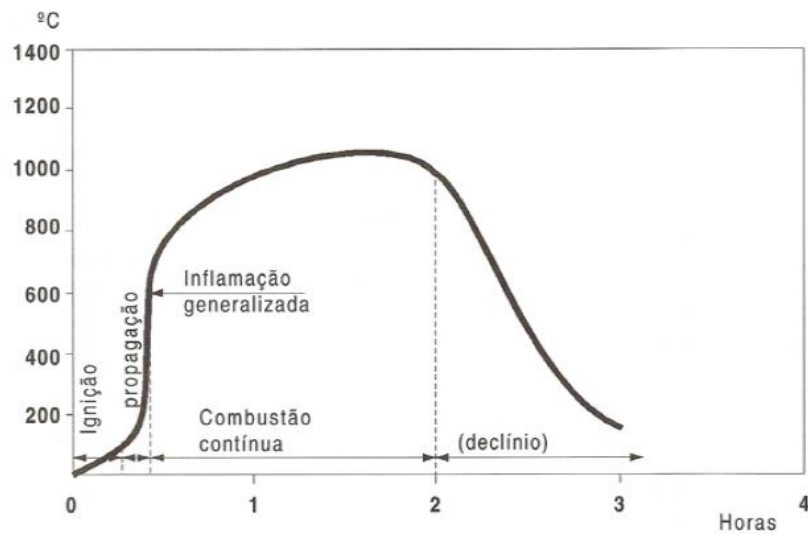


Figura 2.2 - Fases de desenvolvimento de um incêndio (Inácio (2011))

Após a ignição, inicia-se a propagação do fogo, caracterizando-se por um aumento gradual da temperatura com produção de fumos e gases que se acumulam nas zonas mais próximas do teto, aquecendo-as. A temperatura do compartimento irá então elevar-se, até que subitamente o incêndio passa de um foco localizado para um fenómeno generalizado a todo o compartimento. Esta passagem corresponde à fase *flashover* ocorrendo quando a superfície de todo o material combustível presente entra em ignição. Em seguida surge a fase de combustão contínua atingindo-se a temperatura máxima do incêndio, com grande libertação de gases. Com a diminuição da quantidade de material combustível dá-se o declínio do incêndio. Quando a totalidade dos materiais combustíveis forem consumidos, o fogo extingue-se, podendo considerar-se de uma forma geral que com 80% do material consumido se entra na fase de extinção.

Neste contexto é fácil perceber que o fenómeno de incêndio é influenciado por vários fatores, entre os quais se pode destacar a compartimentação do local em chamas, a quantidade de material combustível (carga de incêndio) e a ventilação do local. Como tal, cada incêndio constitui um caso único com grande variabilidade associada, e sujeito a alterações das condições iniciais de análise, uma vez que um edifício não se mantém imutável no tempo, tanto a nível de arquitetura como de utilização.

2.4 PROPAGAÇÃO DO CALOR

A propagação de calor é um fenómeno físico que está intimamente ligado aos mecanismos de desenvolvimento de um incêndio. O fenómeno de transferência de energia térmica ocorre por processos de condução, convecção e radiação, representados na Figura 2.3.

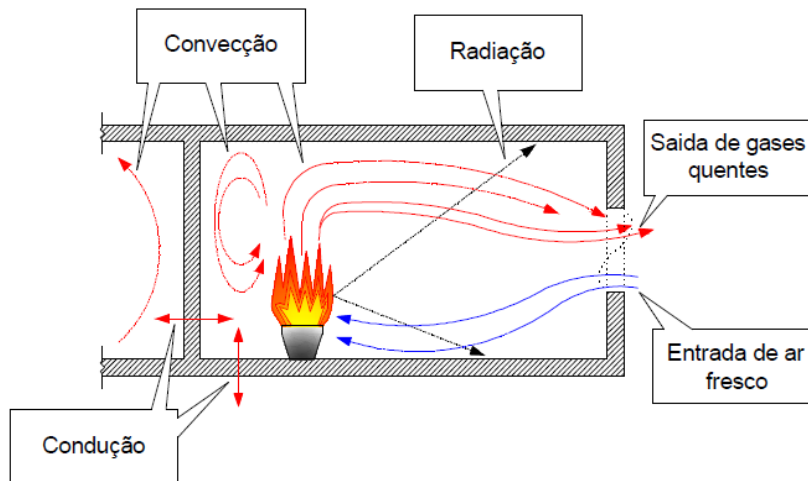


Figura 2.3 - Diferentes processos de transmissão de calor (Inácio (2011))

No interior de um edifício, as transmissões de calor sob a forma de condução decorrem por transferências térmicas entre os elementos construtivos e materiais não combustíveis. Por sua vez, a convecção é originada pela movimentação de gases quentes sobre as superfícies envolventes do edifício, tais como pavimentos, tetos e paredes. A radiação é produzida pelas chamas e fumos sobre elementos visíveis (Inácio (2011)).

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, quando existe um gradiente de temperatura num corpo, a transferência de energia é feita da região de temperatura mais elevada para a de mais baixa temperatura. A lei da condução térmica, também conhecida como lei de Fourier, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura, ou seja (Gavina (2013)):

$$q = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2.1)$$

onde,

q fluxo de calor por condução [W/m^2];

Q quantidade de calor [W];

A área da secção através da qual o calor flui, medida perpendicularmente à direcção do fluxo [m^2]

λ condutividade térmica do material [$W/m^\circ C$];

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$ razão da variação da temperatura com a distância na direcção do fluxo de calor [$^\circ C/m$].

Em coordenadas tridimensionais (x,y e z), a equação geral para a transferência de calor em condução para um material isotrópico admitindo a condutividade térmica constante ao longo do material, tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.2)$$

onde,

α difusibilidade térmica do material com $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$ [m^2/s]

A massa volúmica (ρ), o calor específico (c) e a condutividade térmica (λ), são então propriedades relevantes dos materiais para determinação da sua temperatura em situação de incêndio.

A convecção processa-se através da troca de energia calorífica entre partes em movimento de um fluido, ou entre este e superfícies sólidas a diferentes temperaturas. O movimento pode ser provocado por agentes externos (convecção forçada), ou por diferenças de densidade resultantes do próprio aquecimento do fluido (convecção natural) (Gavina, 2013).

O efeito global da convecção pode ser expresso através da lei de arrefecimento de Newton, tal como indicado em seguida:

$$q_c = h_c(\theta - \theta_\infty) \quad (2.3)$$

onde,

q_c fluxo de calor por convecção [W/m^2];

h_c coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/m^2^\circ C$];

θ temperatura da superfície [$^\circ C$];

θ_∞ temperatura do fluido ou ambiente [$^\circ C$].

O coeficiente de transferência de calor por convecção depende de algumas propriedades físicas do fluido, do tipo de movimento do fluido e da geometria da superfície que o fluido percorre.

Por fim a radiação térmica designa-se por toda a energia radiante emitida na gama de comprimentos de onda 0,1 a 100 μm do espectro electromagnético. Resulta da emissão e propagação de ondas eletromagnéticas por alteração na configuração eletrónica de átomos e moléculas. Qualquer corpo com uma temperatura superior a 0°K emite energia radiante (Gavina (2013)).

A transferência de calor por radiação térmica ocorre através de sólidos, líquidos e gases e no vácuo, exceto nos sólidos e líquidos opacos à radiação térmica. É o único processo de transmissão de calor que pode ocorrer no vácuo por não necessitar da presença de nenhum meio material para ocorrer.

A energia radiante que um corpo emite é dada pela lei de Stefan-Boltzmann, aplicada a um corpo real, expressando-se da forma indicada:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (\theta^4 - \theta_{viz}^4) \quad (2.4)$$

onde,

q_r fluxo de calor por radiação [W/m^2];

σ constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$ [$W/m^2 K^4$];

ε emissividade da superfície emissora ($0 < \varepsilon < 1$);

θ_{viz} temperatura da superfície vizinha que envolve o corpo recetor em que $\theta_{viz} < \theta$ [K].

θ temperatura da superfície [K];

2.5 MEDIDAS DE PROTEÇÃO

De modo a proteger as vidas humanas e a propriedade, é importante que seja incorporada na conceção global de um edifício o nível de resistência ao fogo adequado e que sejam especificados os tipos de materiais a utilizar de forma a minimizar o desenvolvimento e consequências do incêndio.

Para isso são adotadas medidas de proteção contra incêndios que são classificadas como proteção ativa ou passiva.

A proteção ativa contra incêndio é constituída por meios (equipamentos e sistemas) que precisam ser acionados, quer manual ou automaticamente, para funcionar em situação de incêndio. Visa a rápida deteção do incêndio, o alerta dos ocupantes do edifício, e realização de ações de combate visando extinguir o incêndio quando ainda está na sua fase inicial.

A proteção passiva contra incêndios é constituída por meios de proteção incorporados na construção do edifício, os quais não requerem nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em caso de

ocorrência do evento, procurando manter a integridade da construção durante um certo período de tempo.

O presente trabalho debruça-se apenas sobre medidas de proteção passiva de estruturas metálicas.

2.5.1 Proteção passiva

As medidas de proteção passiva contra incêndio devem ser implementadas nas fases de concepção, construção e exploração e dependem do risco de incêndio do edifício. Os meios de proteção passiva estão incorporados na construção e não necessitam de qualquer acionamento em situação de incêndio, reagindo passivamente ao seu desenvolvimento, não estabelecendo condições propícias ao seu crescimento e propagação durante o tempo necessário de evacuação dos ocupantes e intervenção dos bombeiros. As características a ter em consideração são:

- Localização (infraestruturas, acessibilidade, distância ao bombeiros);
- Implantação (acessibilidades, entradas, confrontações);
- Organização dos espaços, principalmente as vias de evacuação horizontais e verticais;
- Comportamento ao fogo dos elementos de construção, estruturais, de compartimentação, instalações elétricas, revestimentos e decorações.

Os materiais correntes mais usados na estrutura das construções são o betão armado e o aço, tendo estes comportamentos perante o fogo muito distintos. O betão armado tem uma grande capacidade de absorção de calor, por isso os cuidados a ter prendem-se principalmente com um adequado recobrimento das armaduras, sendo suficiente para respeitar as resistências mínimas. As estruturas realizadas em aço são mais problemáticas, porque este material vê alteradas rapidamente as suas propriedades na presença de temperaturas elevadas, nomeadamente o seu módulo de elasticidade e a sua tensão de cedência. É então necessário aumentar o tempo de início da deformação das estruturas e assim conferir mais segurança à construção (adaptado de Pannoni (2012)).

O presente trabalho foi desenvolvido tendo em vista o estudo de sistemas de proteção contra incêndio aplicáveis nos perfis que compõem a estrutura metálica e mista. Os sistemas mais usuais são as tintas intumescentes, materiais projetados, e placas rígidas ou flexíveis. O sistema a adotar em determinado empreendimento é escolhido com base em razões arquitetónicas, económicas e de segurança.

Estes materiais têm que possuir alguns requisitos essenciais para poderem ser usados na proteção ao fogo, como possuir baixa condutividade térmica, elevado calor específico, resistência às ações térmicas,

perfeita aderência ao substrato mesmo a temperaturas elevadas, resistência física e química, custo compatível com a natureza da obra, serem incombustíveis e não libertar gases tóxicos.

A espessura mínima necessária do sistema de proteção é função do tempo de resistência ao fogo pretendido, o número de faces do perfil metálico diretamente expostas ao fogo e a massividade do perfil.

Os materiais descritos em seguida são algo genéricos, porque na realidade, os materiais comercializados são únicos, e resultam de testes e otimizações por parte dos fabricantes, pelo que os componentes de cada material e suas características podem ser mais ou menos distintos do material teórico.

2.5.1.1 Materiais de proteção

2.5.1.1.1 Tintas intumescentes

O método de proteção contra o fogo de estruturas metálicas através da aplicação de tintas intumescentes é relativamente recente e consiste na aplicação de uma tinta, com características especiais, sobre a superfície a proteger. Na presença de temperaturas elevadas a película de tinta expande, formando uma camada que pode atingir várias dezenas de vezes a espessura inicial, conforme Figura 2.4. Essa camada funciona como isolante térmico da superfície retardando o seu aumento de temperatura e preservando, durante algum tempo, a sua resistência mecânica.

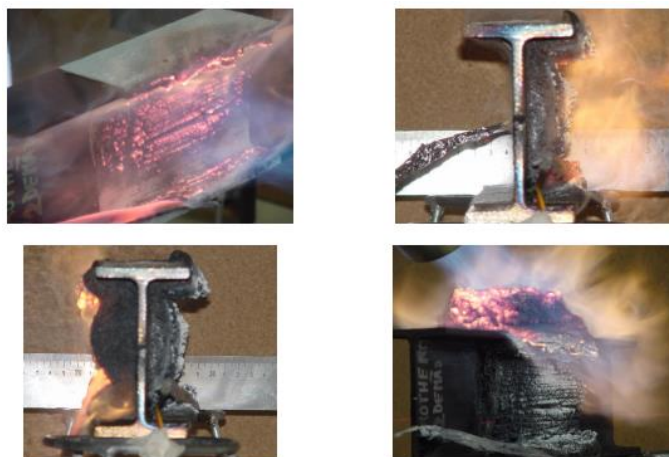


Figura 2.4 - Comportamento expansivo da tinta intumescente em caso de incêndio (Mesquita et al. (2010))

Os revestimentos por pintura intumescente usados na proteção passiva ao fogo de estruturas de aço, são constituídos por componentes ativos, que sob a ação do calor, reagem entre si para formar uma camada carbonosa que isola termicamente o suporte metálico. Geralmente esses componentes ativos consistem numa fonte de ácido (designado por catalisador ou agente desidratante, normalmente o polifosfato de

amónio ou um ácido mineral), uma fonte de carbono (agente carbonífero, por exemplo o pentaeritritol) e um agente expensor (normalmente compostos nitrogenados, por exemplo a melamina). O mecanismo de intumescência inicia-se a cerca de 200 °C com a decomposição do polifosfato de amónio para formar o ácido fosfórico, o amoníaco e a água. Numa segunda etapa, o pentaeritritol reage com o ácido para formar o resíduo carbonoso. Finalmente, entre os 300 °C e os 400 °C, o agente expensor decompõe-se libertando gases que fazem expandir a camada de resíduo carbonoso, que se torna num material relativamente estável a temperaturas na gama entre 430 e 560 °C. Acima destas temperaturas ocorrem reações de oxidação, com formação de uma camada com baixa condutividade térmica. Esta camada funciona como uma barreira isolante que impede a transferência de calor para o perfil durante um determinado período de tempo. É precisamente este período de tempo que pode ser vital na evacuação dos edifícios (adaptado de Pannoni (2012)).

A tinta intumescente pode ser aplicada com recurso à trincha, a rolo, ou com pistola airless. Apresenta boa aplicabilidade, boa lacagem e pode ser aplicada até 1100 micrômetros húmidos por demão sem apresentar escorrimento, variando o tempo de secagem e o rendimento entre marcas. Em relação ao custo da tinta, nas marcas com tintas de preço mais acessível, na maioria dos casos, é necessária maior espessura de proteção, pelo que o preço do litro de tinta não é informação suficiente para definir a solução mais económica. O rendimento é uma questão a nunca ignorar, uma vez que a espessura que é aplicada não corresponde à espessura final, porque com a secagem e conseqüente desidratação ocorre diminuição de volume, obtendo-se espessuras finais inferiores às que foram aplicadas (adaptado de Pannoni (2012)).

A aplicação da tinta faz parte do designado “esquema de pintura”, que envolve a aplicação de uma demão de um primário anticorrosivo (de natureza alquídica ou epoxi) com uma espessura seca, no máximo de 40 a 50 µm. Segue-se a aplicação da tinta intumescente com a espessura seca pretendida e como acabamento pode aplicar-se um esmalte, de preferência monocomponente, com uma espessura seca de 30 a 60 µm. A representação do esquema de pintura pode ser visualizada na Figura 2.5. (adaptado de Pannoni (2012)).

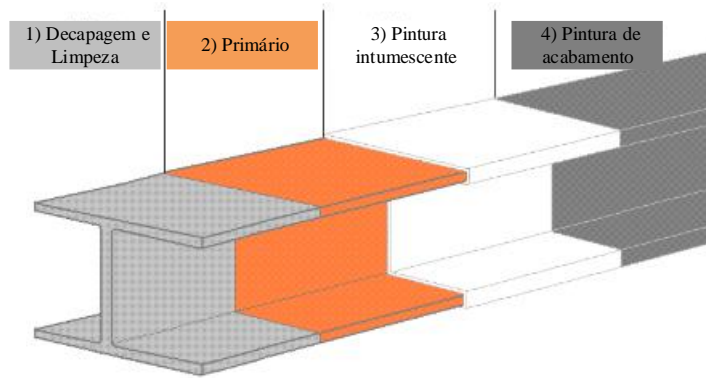


Figura 2.5 - Esquema de pintura de proteção (adaptado de Pannoni (2012))

As tintas intumescentes apresentam algumas vantagens em relação aos outros tipos de proteção, e por isso são as mais utilizadas em obras de grande relevo. Estas possuem um melhor acabamento estético, conservando o formato dos perfis da estrutura, razão pela qual os arquitetos privilegiam esta solução. Sob o ponto de vista da engenharia estrutural a principal vantagem consiste no seu reduzido peso, não causando nenhum impacto em termos de esforços. Possuem também uma baixa toxicidade, são de fácil aplicação, até em estruturas que se encontrem em serviço.

Por conseguinte, este tipo de proteção é então aplicado no contorno do perfil, adotando o seu formato, como exemplificado na Figura 2.6.

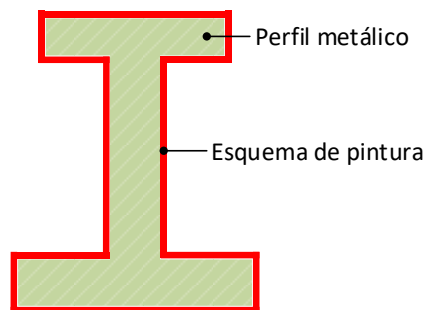


Figura 2.6 - Proteção no contorno do perfil metálico

A desvantagem que possui é o seu elevado custo em comparação com outros sistemas de proteção, pelo que em empreendimentos que a funcionalidade sobreponha-se à estética outras soluções poderão ser mais apropriadas. Para além disso, a tinta tem que ser alvo de inspeções para verificar a sua integridade e em caso de algum incidente a substituição da proteção tem que ser total.

Na Figura 2.7 é apresentada uma obra emblemática, o Aeroporto Sá Carneiro, onde foi utilizada como proteção tinta intumescente, que resultou num efeito visual muito interessante da estrutura metálica.



Figura 2.7 – A estrutura metálica do Aeroporto Sá Carneiro é protegida com recurso a tintas intumescentes (SP Project (2007))

2.5.1.1.2 Materiais projetados

Estes materiais apresentam bom isolamento térmico às altas temperaturas, mantendo a integridade da estrutura durante a evolução do incêndio. São aplicados por projeção e, após a sua secagem, trabalham monoliticamente com a estrutura, acompanhando seus movimentos, sem a ocorrência de fissuras ou desprendimento.

Sua durabilidade deverá ser a mesma da estrutura, dispensando manutenção, e não deve provocar qualquer tipo de ataque corrosivo ao aço. Não são higroscópicos, tornando desnecessário o uso de tintas ou outros sistemas de proteção contra a corrosão em estruturas internas. As estruturas externas costumam receber proteção de um primário anticorrosivo e uma ponte de aderência (resina acrílica de base água) com o material projetado, para que não haja o desenvolvimento da corrosão sob a camada passiva (Pannoni (2012)).

Os materiais projetados podem ser constituídas por fibras minerais (lã de rocha, fibra de vidro), agregados minerais (vermiculite, perlite), ou ligantes (cimento, gesso).

Este tipo de proteção também é aplicado no contorno do perfil metálico, aumentando significativamente a espessura do elemento em comparação com as tintas intumescentes.



Figura 2.8 - Proteção através de materiais projetados

Entre os materiais projetados distinguem-se as argamassas e as fibras projetadas.

As argamassas projetadas são produtos com alto conteúdo de aglomerantes que, quando misturados com água, geram uma massa fluida que pode ser bombeada. São apresentados como produtos de baixa, média ou alta densidade, e são constituídos basicamente de gesso (aproximadamente 80% do peso seco), cimento Portland (em materiais de média e alta densidade), resinas acrílicas e cargas inertes, tais como poliestireno expandido, celulose e aditivos.

Os materiais de baixa densidade são aplicados, de modo geral, em obras internas e os materiais de média densidade são utilizados em obras internas com certos requisitos de resistência ao impacto e à humidade. Os de alta densidade são utilizados em obras externas onde o risco de impacto é alto, assim como a humidade (Pannoni (2012)).

Estes produtos, de modo geral, não necessitam para a sua aplicação da retirada de alguma ferrugem formada, fazendo-se antes da projeção uma limpeza manual, retirando-se o material solto sobre a superfície.

Quando a temperatura ambiente atinge 90°C – 150°C, as ligações químicas existentes no gesso hidratado começam a romper, libertando água de hidratação. Esta reação absorve a energia do fogo, que seria conduzida ao aço. Este processo permite ao aço manter uma temperatura relativamente baixa por 20 a 30 minutos durante a primeira hora crítica do incêndio. A proteção também se deve a fatores relacionados com a massa do material e o seu índice de vazios (Pannoni (2012)).

As fibras projetadas são produtos de baixa e média densidade, contendo basicamente fibras obtidas a partir de rocha basáltica (ou escória de alto-forno) como principal constituinte. Estas fibras são misturadas com escória de alto-forno (20 a 30% do peso seco total) para criar uma mistura de baixa densidade.

A proteção à base de fibras utiliza as propriedades isolantes da fibra para proteger o aço. Existem ainda diferentes argamassas que incluem na sua composição vermiculite ou perlite, em conjunto com cimento Portland ou gesso (Pannoni (2012)).

2.5.1.1.3 Placas rígidas e flexíveis

As placas de gesso cartonado (ver Figura 2.9) são do tipo rígidas, contendo na sua composição fibra de vidro, e, em alguns casos, vermiculite incorporada. O gesso da placa perde moléculas de água de hidratação durante o aquecimento, mantendo baixa a temperatura do aço. A placa tem no seu interior uma malha de fibra de vidro, que mantém a integridade da placa quando exposta às elevadas temperaturas do incêndio (Pannoni (2012)).



Figura 2.9 – Placa de gesso cartonado hidrófugo (JMC (2016))

Este tipo de proteção esconde os perfis da estrutura metálica, formando geralmente uma caixa em redor dos mesmos, como se verifica na Figura 2.10.

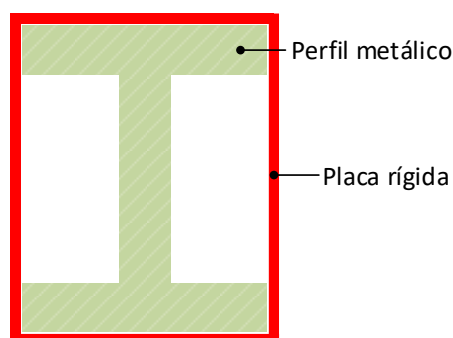


Figura 2.10 – Proteção por placas em caixão

As placas de lã de rocha são painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos obtidos do basalto, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecidas. São fixadas com pinos de aço soldados à estrutura metálica.



Figura 2.11 – Placas de lã de rocha (Rentec, 2010)

Estes podem ser aplicados no contorno do perfil se forem flexíveis, ou em forma de caixão se forem rígidos.

3 ASPETOS REGULAMENTARES DE ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEGUNDO OS EUROCÓDIGOS

3.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ESTRUTURA EXPOSTA AO FOGO

Os Eurocódigos Estruturais abordam medidas passivas de proteção contra incêndio através da concepção da estrutura e partes da estrutura, visando assegurar uma adequada capacidade resistente em caso de incêndio, e limitar a propagação do fogo.

A resistência estrutural deverá ser adequada para o período de tempo especificado (Ex: R=30, R=120, etc.). Este período é função da utilização tipo a que se destina o edifício e a categoria de risco em que insere, como definido no Regulamento Geral de Segurança Contra Incêndios em Edifícios.

Em termos de projeto para resistência ao fogo, na EN 1990 é indicado que a análise estrutural deve basear-se em cenários de incêndio de cálculo e deve considerar modelos de evolução da temperatura na estrutura, assim como modelos de comportamento mecânico da estrutura a temperaturas elevadas. O desempenho da estrutura quando exposta a situação de incêndio deve ser verificado por meio de análise global, análise por subestruturas, ou análise elemento a elemento.

Na Figura 3.1 são apresentadas as metodologias possíveis de cálculo que podem ser adotadas para verificar o comportamento de um sistema estrutural a temperaturas elevadas.

No presente trabalho foi adotada uma abordagem prescritiva por elementos, efetuando-se a determinação das necessidades de proteção passiva da estrutura através de modelos de cálculo simplificados.

A abordagem prescritiva assenta num conjunto de regras e formulações estipuladas nos Eurocódigos, para dimensionamento e verificação da resistência dos elementos estruturais com e sem proteção passiva. Quando se opta por este método as ações térmicas são determinadas em função de curvas nominais do fogo, isto é, em curvas padronizadas que definem uma relação temperatura/tempo e que não traduzem a variabilidade e unicidade de um incêndio. Deste modo não há lugar ao estudo dos vários cenários de incêndio relevantes que poderão ocorrer em função das condicionantes de um edifício, nem à caracterização do seu desenvolvimento com o tempo.

No procedimento baseado em curvas nominais de incêndio, o nível de desempenho a atingir limita-se à definição do tempo de resistência ao fogo que os elementos devem cumprir, sendo este definido pela

regulamentação nacional. Este requisito pode e deve ser especificado de forma a considerar implicitamente a variabilidade e incerteza de um fogo real.

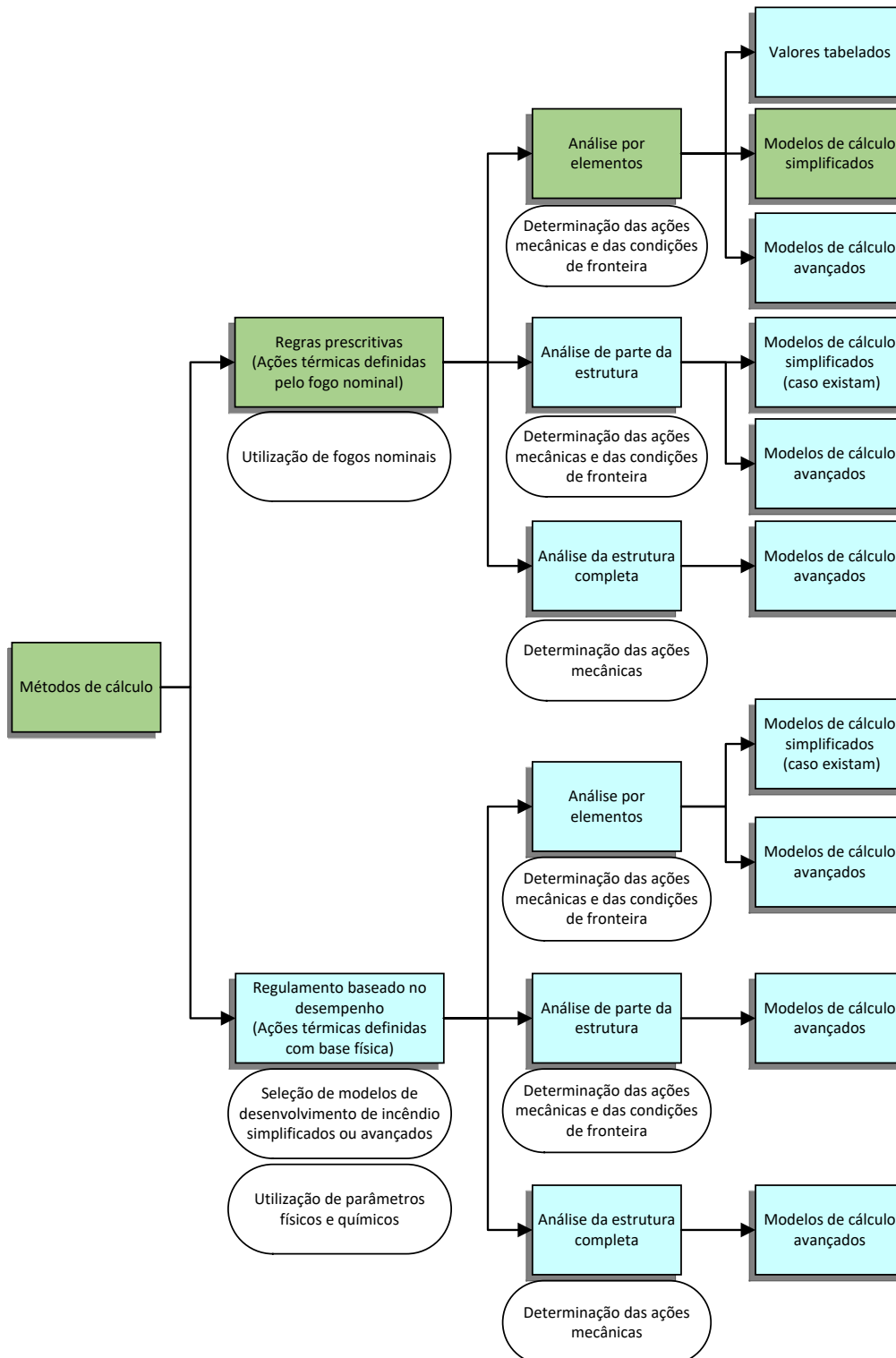


Figura 3.1 - Métodos de cálculo constantes da EN 1991-1-2 para verificação da resistência ao fogo (adaptado da EN 1991-1-2 (2010))

A verificação da resistência ao fogo pode ser feita no domínio do tempo

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (3.1)$$

no domínio da resistência

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (3.2)$$

ou no domínio da temperatura

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (3.3)$$

onde,

$t_{fi,d}$ - valor de cálculo da resistência ao fogo;

$t_{fi,requ}$ - tempo requerido de resistência ao fogo;

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

$E_{fi,d,t}$ - valor de cálculo dos efeitos relevantes das ações em situação de incêndio, no instante t;

θ_d - valor de cálculo da temperatura dos materiais;

$\theta_{cr,d}$ - valor de cálculo da temperatura crítica dos materiais.

No presente trabalho foi privilegiada uma análise no domínio da resistência, uma vez que torna o processo mais intuitivo e já existe alguma sensibilidade nesse tipo de análise estrutural.

3.2 AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

O cálculo estrutural em relação à ação do fogo envolve a aplicação de ações para análise de temperaturas e de ações para análise mecânica, de acordo com a Norma EN 1991-1-2 e algumas Partes da EN 1991.

A ação do fogo nas estruturas é classificada como ação de acidente. Segundo a norma EN 1990 (2009) regulamentada em Portugal a expressão dos efeitos das ações de acidente é a seguinte:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3.4)$$

onde,

E_d – valor de cálculo do efeito das ações;

G_k – valor característico de uma ação permanente;

P – valor representativo de uma ação de pré-esforço;

A_d – valor de cálculo de uma ação de acidente;

Ψ_1 – coeficiente para a determinação do valor frequente de uma ação variável;

Ψ_2 – coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável;

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

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

Os coeficientes parciais de segurança das ações para os estados limites últimos nas situações de projeto acidentais e sísmicas deverão ser iguais a 1,0.

3.3 REPRESENTAÇÃO DA AÇÃO TÉRMICA POR CURVAS DE INCÊNDIO

Existem dois tipos de curvas para a representação da evolução de um incêndio, as curvas de incêndio nominais e paramétricas.

As curvas paramétricas representam a evolução da temperatura no compartimento com o tempo, em função de parâmetros físicos que influenciam a propagação do incêndio no seu interior. Estas curvas são válidas para compartimentos de incêndio com o máximo de 500 m² de área em planta, sem aberturas na cobertura e um pé direito máximo de 4 m. As curvas paramétricas não serão abordadas no presente trabalho.

As curvas de incêndio nominais representam a temperatura dos gases na proximidade de um elemento sujeito ao fogo em função do tempo de exposição. São funções analíticas que não representam a situação de um incêndio real. As temperaturas obtidas pelas curvas nominais são da mesma ordem de grandeza das que se verificam na realidade, pelo que a sua utilização é viável e prescrita nas normas europeias. As três curvas apresentadas pela EN 1991-1-2 são as curvas padrão, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio devido à combustão de hidrocarbonetos, representadas graficamente na Figura 3.2.

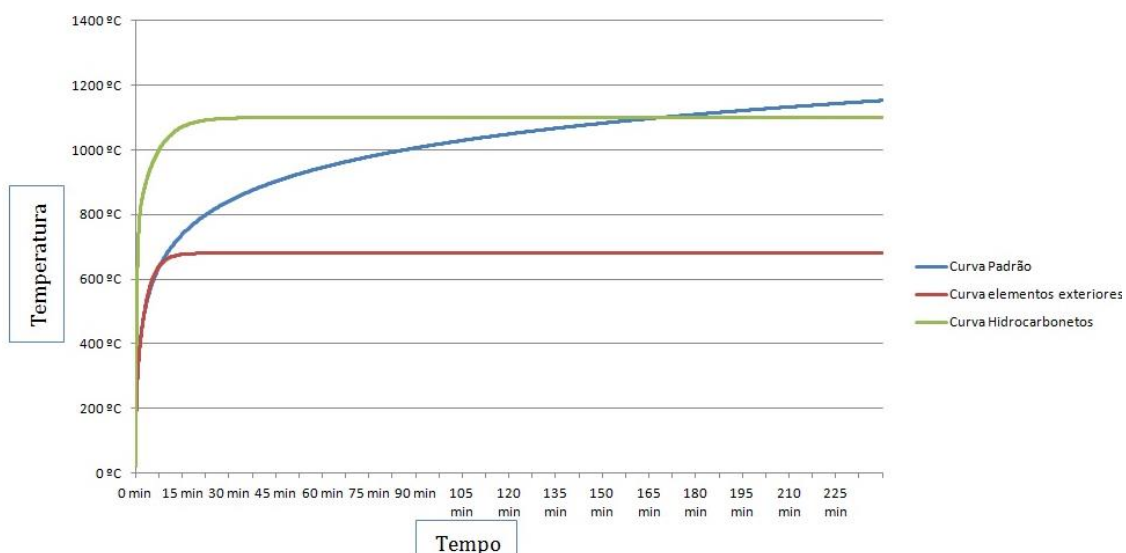


Figura 3.2 - Representação gráfica das curvas padrão, de elementos exteriores e de fogo com hidrocarbonetos

3.3.1 Curva de incêndio padrão (ISO 834)

É a curva mais utilizada, e representa uma situação de incêndio totalmente desenvolvido. Como se pode verificar na Figura 3.3, a curva de incêndio padrão não considera a fase de *pré-flashover*, sendo traçada apenas depois da ocorrência do *flashover* e nunca decresce, ou seja, não considera a fase de arrefecimento do incêndio. Esta curva é considerada em todo o compartimento mesmo que este tenha grandes dimensões e não atende à sua carga de incêndio e às condições de ventilação.

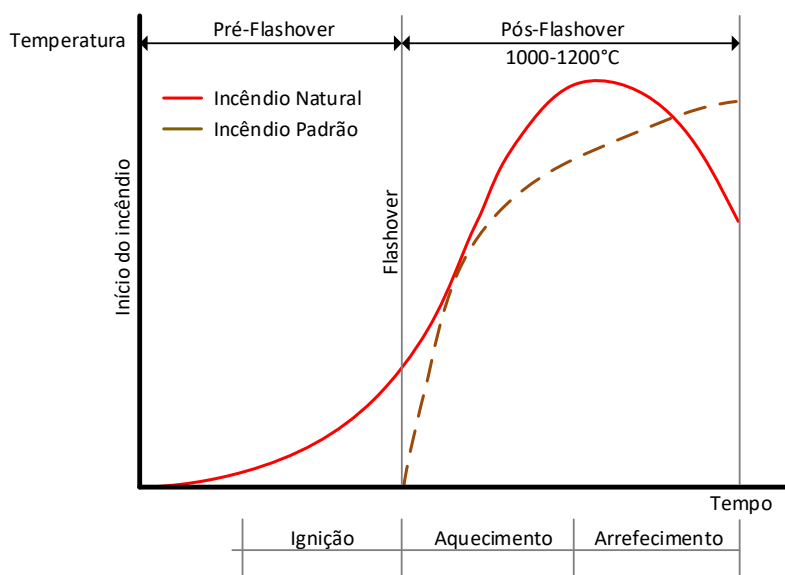


Figura 3.3 – Comparação da evolução da temperatura entre as fases de um incêndio natural e do incêndio padrão (Pannoni (2012))

A curva de incêndio padrão é definida por:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.5)$$

onde,

θ_g - temperatura dos gases no compartimento de incêndio [$^{\circ}\text{C}$]

t - tempo [min].

3.3.2 Curva de incêndio para elementos exteriores

Esta curva de incêndio é usada para elementos estruturais exteriores expostos ao fogo proveniente do interior do compartimento, situados ao seu nível ou a uma cota inferior, através dos vãos existentes na fachada.

A curva de incêndio para elementos exteriores é definida por:

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687^{-0,32t} - 0,313^{-3,8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.6)$$

onde,

θ_g - temperatura dos gases na proximidade do elemento [$^{\circ}\text{C}$]

t - tempo [min].

3.3.3 Curva de Incêndio de Hidrocarbonetos

Esta curva é usada quando se prevê a existência de hidrocarbonetos no compartimento a considerar. Estes têm a característica comum de oxidarem com bastante facilidade, libertando quantidades consideráveis de energia e calor, pelo que esta curva tem um comportamento mais gravoso do que a curva padrão.

A curva de incêndio de hidrocarbonetos é definida por:

$$\theta_g = 1080 (1 - 0,325^{-0,167t} - 0,675^{-2,5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.7)$$

onde,

θ_g - temperatura dos gases no compartimento de incêndio [$^{\circ}\text{C}$]

t - tempo [min].

3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ESTRUTURAL A TEMPERATURA ELEVADA

As propriedades mecânicas do aço são distintas consoante esteja sujeita à temperatura ambiente ou sobre a ação da temperatura.

Os valores da tensão de cedência f_y e da tensão última à tração f_u para aços estruturais laminados a quente estão definidos na EN 1993-1-1 (2009). Estes aços cumprem os requisitos de ductilidade que a norma impõe para que possam ser usados como material estrutural.

A resistência do aço diminui com o aumento da temperatura, como se pode verificar pelos fatores de redução listados na Tabela 3.1, sendo as propriedades que se destacam a tensão de cedência efetiva e o módulo de elasticidade, sendo estes parâmetros utilizados para reduzir as propriedades dos elementos na verificação da resistência sob temperaturas elevadas.

Para valores intermédios da temperatura do aço podem ser realizadas interpolações lineares.

Tabela 3.1 - Fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2 (2010))

Temperatura do aço θ_a	Fatores de redução à temperatura θ_a referidos ao valor de f_y ou E_a a 20 °C		
	Fator de redução para a tensão de cedência efetiva	Fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

Apresenta-se um gráfico na Figura 3.4 que compara os fatores de redução.

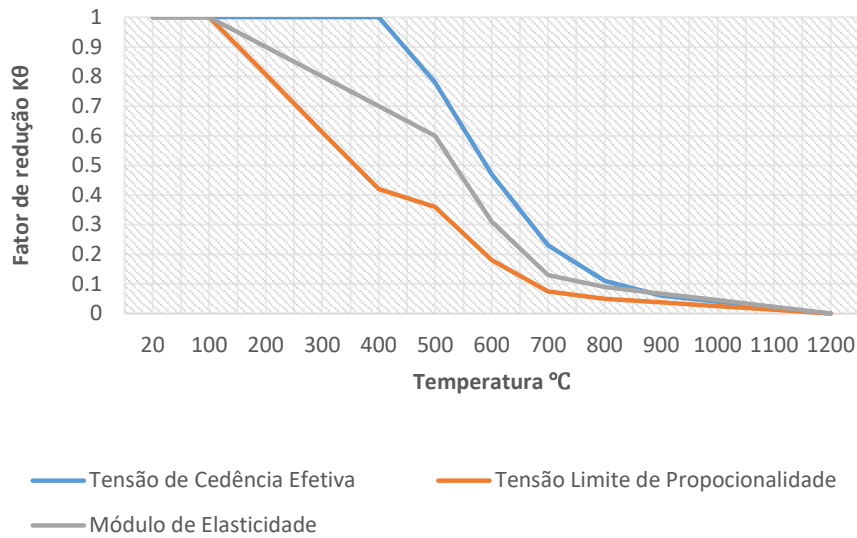


Figura 3.4 – Fatores de redução para as propriedades mecânicas do aço carbono a temperaturas elevadas

3.5 DESENVOLVIMENTO DA TEMPERATURA EM ELEMENTOS METÁLICOS

3.5.1 Elementos sem material de proteção

Considerando uma distribuição de temperatura uniforme ao longo da seção transversal do perfil de aço, o aumento de temperatura $\Delta\vartheta_{a,t}$ no elemento de aço não protegido durante um intervalo de tempo Δt é determinado a partir de:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (3.8)$$

onde,

k_{sh} - fator de correção para o efeito de sombra;

A_m/V - fator de massividade para os elementos de aço não protegidos [m^{-1}];

A_m - área da superfície do elemento por unidade de comprimento [m^2/m];

V - volume do elemento por unidade de comprimento [m^3/m];

c_a - calor específico do aço [J/kgK];

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

Δt - intervalo de tempo (não devem ser usados valores superiores a 5 segundos como definido na secção 4 da EN 1993-1-2:2010) [s];

ρ_a - massa específica do aço, definida na secção 3 da EN 1993-1-2:2010 com o valor de 7850 kg/m³.

3.5.1.1 Fator de massividade

O fator de massividade é um parâmetro de extrema importância na determinação da evolução da temperatura num elemento metálico, nomeadamente quando se efetua o cálculo pelo método simplificado.

Em termos gerais, a velocidade a que é elevada a temperatura num dado elemento metálico é proporcional à área da superfície exposta ao fogo (A_m) e inversamente proporcional à massa ou volume (V) desse elemento. Como facilmente se percebe, um elemento esbelto, como os perfis Z utilizados em madres de cobertura, aquecem muito mais rapidamente do que elementos robustos, como os perfis geralmente aplicados em pilares. Isto significa que a taxa de aquecimento de um perfil metálico depende da relação A_m/V , sendo esta designada de fator de massividade.

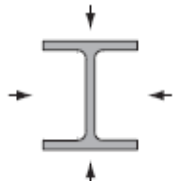
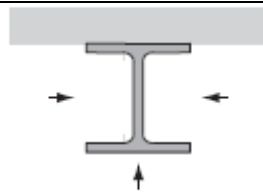
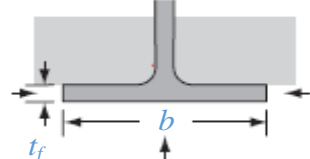
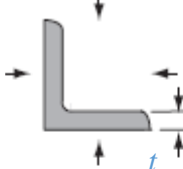
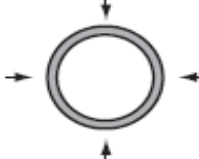
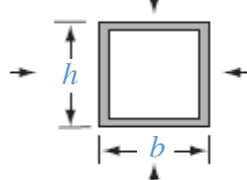
Para elementos prismáticos, cujas condições de fronteira são constantes ao longo do seu comprimento, a distribuição de temperatura é bidimensional, passando esta relação a ser determinada pelo perímetro (P) exposto ao fogo sobre a área da secção transversal do elemento (A):

$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \times l}{A \times l} = \frac{P}{A} \quad [m^{-1}] \quad (3.9)$$

em que l é o comprimento do elemento [m].

Na Tabela 3.2 são apresentados alguns exemplos do cálculo do fator de massividade.

Tabela 3.2 - Fatores de massividade para diferentes secções (adaptado de Lennon et al. (2007))

Secção transversal	Descrição	Fator de massividade
	Secção sem proteção exposta ao fogo em todos os lados	$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro da secção}}{\text{área da secção}}$
	Secção sem proteção exposta em 3 lados	$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro da superfície exposta}}{\text{área da secção}}$
	Banzo sem proteção exposto em 3 lados	$\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t_f}{bt_f}$
	Cantoneira sem proteção exposta em todos os lados	$\frac{A_m}{V} \cong \frac{2}{t}$
	Tubular circular sem proteção exposto em todos os lados	$\frac{A_m}{V} \cong \frac{1}{t}$
	Tubular retangular sem proteção exposto em todos os lados	$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{área da secção}}$


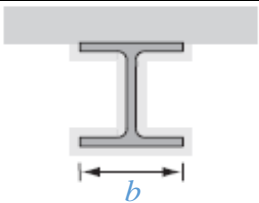
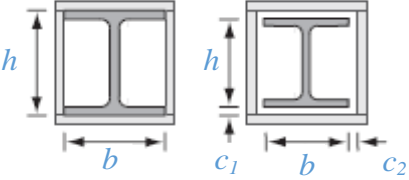
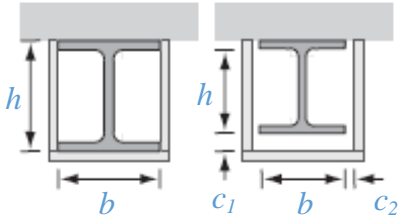
Quanto mais esbelta for uma secção, maior será a sua massividade e consequentemente maior é a taxa de aquecimento do elemento metálico. Adicionalmente, quando os perfis dispõem de proteção passiva ao fogo, o fator de massividade deve ser modificado de acordo com as características do sistema de proteção.

Na Tabela 3.3 apresentam-se alguns exemplos do cálculo dos fatores de massividade, de acordo com o sistema de proteção aplicado, passando-se agora a designar por $\frac{A_p}{V}$.

Para proteções envolvendo todo o contorno da secção, como é o caso da tinta intumescente e das argamassas projetadas, A_p é o perímetro da secção do perfil, enquanto que quando a proteção é do tipo

caixão, A_p corresponde ao contorno interior do sistema de proteção, limitado à altura e largura da secção do perfil. Em ambos os casos a área corresponde sempre à da secção do perfil metálico.

Tabela 3.3 - Fatores de massividade para diferentes sistemas de proteção passiva ao fogo (adaptado de Lennon et al. (2007))

Secção transversal	Descrição	Fator de massividade
	Secção com proteção envolvendo o contorno e exposta em todos os lados	$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{perímetro da secção}}{\text{área da secção}}$
	Secção com proteção envolvendo o contorno e exposta em 3 lados	$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{perímetro da secção} - b}{\text{área da secção}}$
	Secção com proteção em caixão e exposta em todos os lados	$\frac{A_p}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{área da secção}}$
	Secção com proteção em caixão e exposta em 3 lados	$\frac{A_p}{V} = \frac{2h + b}{\text{área da secção}}$

Nota: as folgas c_1 e c_2 não devem exceder $h/4$

3.5.1.2 Efeito de sombra

O efeito de sombra é ilustrado esquematicamente na Figura 3.5.

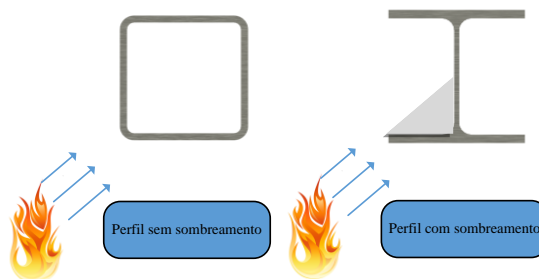


Figura 3.5 - Efeito de sombreamento na exposição ao fogo (Gavina (2013))

Para as secções em I sujeitas às ações do fogo nominal, o fator de correção para o efeito de sombra poderá ser determinado a partir de:

$$k_{sh} = 0,9[A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (3.10)$$

Onde,

$[A_m/V]_b$ - fator de massividade calculado como se o perfil tivesse proteção em caixão.

Em todos os outros casos, o valor de k_{sh} deverá ser considerado igual a:

$$k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V] \quad (3.11)$$

Nas secções transversais de forma convexa (por exemplo, secções ocas retangulares ou circulares) totalmente envolvidas pelo fogo, não ocorre efeito de sombra por isso este fator toma o valor unitário. Para as restantes situações assumir o valor unitário conduz a soluções conservativas.

Não devem ser utilizados valores do fator de massividade inferiores a $10m^{-1}$ na expressão (3.11), porque abaixo desse valor não é correto considerar que a temperatura é constante ao longo da seção transversal do perfil devido à sua robustez.

3.5.1.3 Fluxo de calor

O fluxo de calor efetivo de uma superfície exposta ao fogo, considerando a transferência de calor por convecção e radiação, é dado por:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [W/m^2] \quad (3.12)$$

onde,

$\dot{h}_{net,c}$ - fluxo de calor efetivo por convecção;

$\dot{h}_{net,r}$ - fluxo de calor efetivo por radiação.

A componente do fluxo de calor efetivo por convecção é obtida por:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \quad [W/m^2] \quad (3.13)$$

onde α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual depende do tipo de curva nominal considerada.

Na Tabela 3.4 apresenta-se os valores para os coeficientes de transferência de calor por convecção.

Tabela 3.4 - Valores do coeficiente de transferência de calor por convecção

Tipo Curva Nominal	α_c [W/m ² K]
Curva de Incêndio Padrão	25
Curva de Incêndio para Elementos Exteriores	25
Curva de fogo por Hidrocarbonatos	50

Θ_g - temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo (determinadas através das curvas nominais ou por modelos de incêndio) [°C];

Θ_m - temperatura da superfície do elemento (resulta do cálculo da temperatura a que se encontra o perfil, obtido através do cálculo incremental da expressão (3.8)) [°C].

No lado não exposto dos elementos de compartimentação, o fluxo de calor efetivo \dot{h}_{net} deverá ser determinado utilizando a expressão (3.13), com $\alpha_c = 4$ [W/m²K]. O coeficiente de transferência de calor por convecção deverá ser tomado como $\alpha_c = 9$ [W/m²K], quando se admite que inclui os efeitos da transferência de calor por radiação.

A componente do fluxo de calor efetivo por radiação é obtida por:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.14)$$

Onde,

Φ - fator de vista (em 3.1(7) da EN 1991-1-2 é apontado o valor de 1,0 para este fator como conservativo, podendo este ser inferior à unidade para ter em conta os efeitos de posição e de sombra, sendo nesse caso calculado pelo anexo G da mesma norma; o valor obtido é validado na EN 1993-1-2);

ε_m - emissividade da superfície do elemento (em 2.2(2) da EN 1993-1-2:2010 é fornecido o valor de 0,7 para o aço carbono e de 0,4 para o aço inoxidável);

ε_f - emissividade do fogo (em 3.1(6) da EN 1991-1-2 é apontado o valor de 1,0 sendo este valor ratificado na EN 1993-1-2);

σ - constante de Stephan Boltzmann (= $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]);

Θ_r - temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio (se o elemento estiver totalmente envolvido pelo fogo, esta temperatura pode ser tomada como idêntica à temperatura do gás Θ_g que o envolve) [°C];

θ_m - temperatura da superfície do elemento (resulta do cálculo da temperatura a que se encontra o perfil, obtido através do cálculo incremental da Expressão (3.8)) [°C].

3.5.1.4 Calor específico

O calor específico do aço c_a varia com a temperatura a que o material se encontra e é obtido através das seguintes expressões:

- $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad [\text{J/kgK}] \quad (3.15)$$

- $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad [\text{J/kgK}] \quad (3.16)$$

- $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad [\text{J/kgK}] \quad (3.17)$$

- $900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$c_a = 650 \quad [\text{J/kgK}] \quad (3.18)$$

onde θ_a é a temperatura do aço [°C].

Na Figura 3.6 está representada a variação do calor específico com a temperatura.

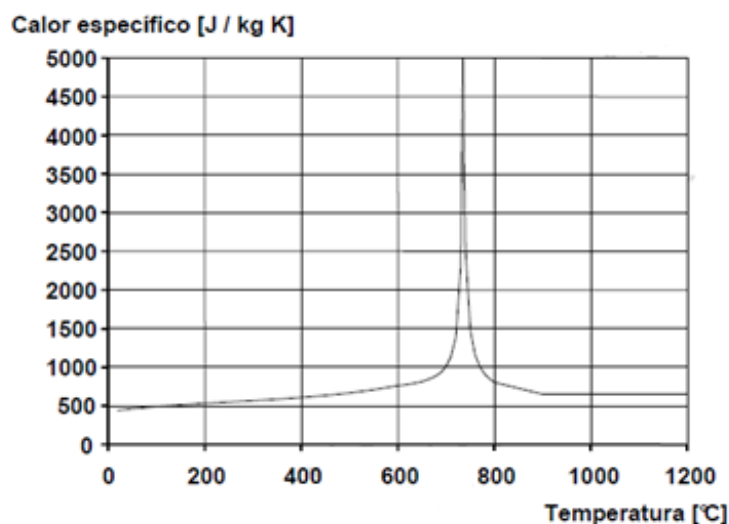


Figura 3.6 - Variação do calor específico do aço com a temperatura

3.5.2 Elementos com material de proteção

Considerando uma distribuição de temperatura uniforme na secção transversal do perfil, o aumento de temperatura de um elemento de aço isolado durante um intervalo de tempo, é obtido por:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \emptyset/3)} \Delta t - \left(e^{\frac{\emptyset}{10}} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \quad (\text{mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0) \quad (3.19)$$

com,

$$\emptyset = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \quad (3.20)$$

Onde,

A_p/V - fator de massividade para os elementos de aço por meio de material de proteção contra incêndio;

A_p - área apropriada do material de proteção contra incêndio por unidade de comprimento do elemento [m^2/m];

V - volume do elemento por unidade de comprimento [m^3/m];

c_a - calor específico do aço [J/kgK];

c_p - calor específico do material de proteção contra incêndio independente da temperatura [J/kgK];

d_p - espessura do material de proteção contra incêndio;

Δt - intervalo de tempo (não devem ser usados valores superiores a 30 segundos como definido em 4.2.5.2(3) da EN 1993-1-2(2010) [s];

$\theta_{a,t}$ - temperatura do aço no instante t [$^{\circ}C$];

$\theta_{g,t}$ - temperatura ambiente dos gases no instante t [$^{\circ}C$];

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

λ_p - condutibilidade térmica do sistema de proteção contra incêndio [W/mK];

ρ_a - massa específica do aço, definida na secção 3 da EN 1993-1-2:2010 com o valor de 7850 kg/m^3 ;

ρ_p - massa específica do material de proteção contra incêndio [kg/m^3].

Segundo a secção 3 da EN1993-1-2 (2010) as propriedades calor específico, condutibilidade térmica e massa específica do material de proteção, deverão ser obtidas utilizando os métodos de ensaio indicados na ENV 13381-1(2005), na ENV 13381-2(2002) ou na ENV 13381-4(2002), conforme apropriado.

3.5.2.1 Tempo de atraso

As condutibilidades térmicas tabeladas dos materiais de proteção contra incêndio referem-se normalmente a materiais secos. Na secção 4 da EN 1993-1-2 (2010) é referido que para os materiais húmidos, o cálculo do aumento da temperatura do aço poderá ser modificado para ter em conta um atraso na subida da temperatura do aço quando atinge os 100°C (temperatura de evaporação da água).

O tempo de atraso devido à humidade do material pode ser determinado através da expressão, retirada do *Fire design of steel structures* (Franssen e Vila Real (2010)):

$$t_v = \frac{p \rho_p d_p^2}{5 \lambda_p} \text{ [min.]} \quad (p \text{ in } \%) \quad (3.21)$$

onde p é a percentagem de humidade do material de proteção;

A Figura 3.7 mostra a representação gráfica do tempo de atraso.

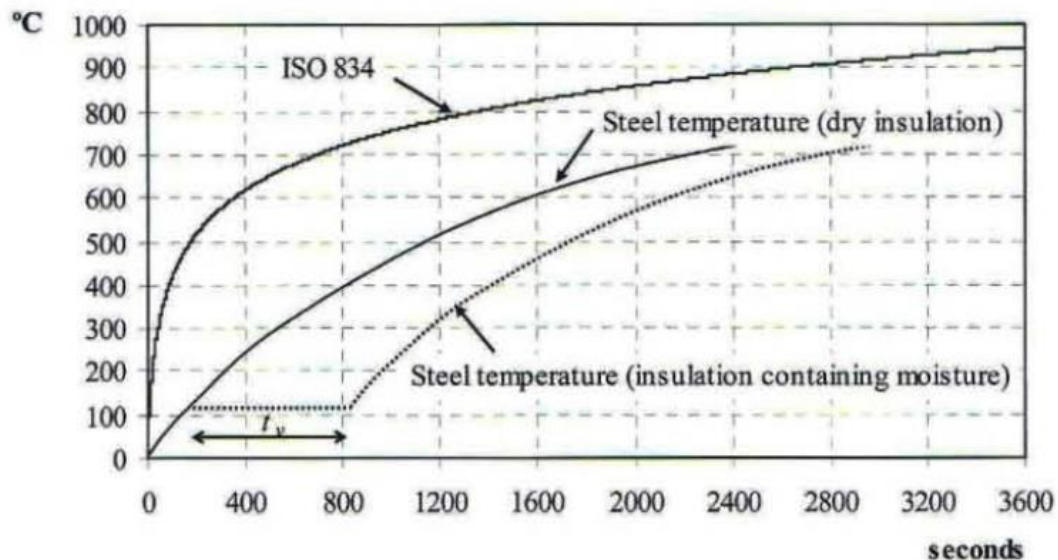


Figura 3.7 - Representação gráfica do tempo de atraso (Franssen e Vila Real (2010))

3.6 DESENVOLVIMENTO DA TEMPERATURA EM VIGAS MISTAS

No cálculo da evolução da temperatura nas vigas mistas aço-betão, ao contrário das estruturas metálicas, o seu desenvolvimento não é constante, uma vez que o aço e o betão possuem características distintas na resposta à temperatura. Nesta secção irão ser indicadas as limitações que o modelo de cálculo simplificado impõe ao formato de viga, e caracterizado o comportamento do elemento metálico (com ou sem proteção passiva ao fogo) e do betão.

O modelo de cálculo simplificado é aplicado a secções mistas em que o perfil metálico não possui revestimento de betão, conforme os exemplos da Figura 3.8. O cálculo do desenvolvimento da temperatura depende do perfil metálico, da laje de betão, conetores e das armaduras inseridas na laje de betão. O efeito da chapa colaborante é desprezado em situação de incêndio, uma vez que possuem espessuras muito reduzidas, perdendo rapidamente as suas características resistentes quando sujeitas a temperaturas elevadas.

Ressalva-se no entanto que a EN 1994-1-2 (2008) dispõe de modelos de cálculo simplificados para vigas mistas parcialmente revestidas de betão, mas apenas no que diz respeito ao comportamento estrutural não sendo necessário o cálculo da evolução da temperatura mas apenas o tempo de resistência ao fogo requerido.

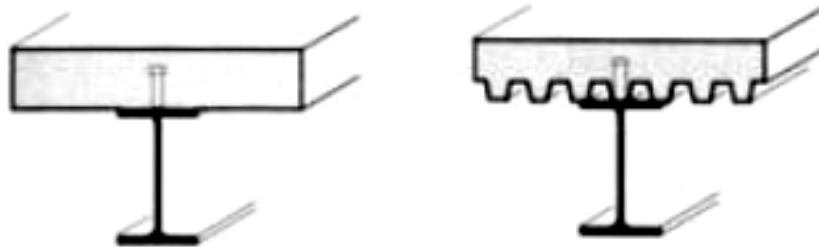


Figura 3.8 – Tipologias de secções transversais de vigas mistas abrangidas pelos modelos de cálculo simplificado (EN 1994-1-2 (2008))

O Eurocódigo define que a secção transversal do perfil metálico pode ser dividida em três partes, como indicado na Figura 3.9, sendo a temperatura calculada para cada uma individualmente, e admitindo que não acontece transferência de calor entre o banzo superior e a laje de betão.

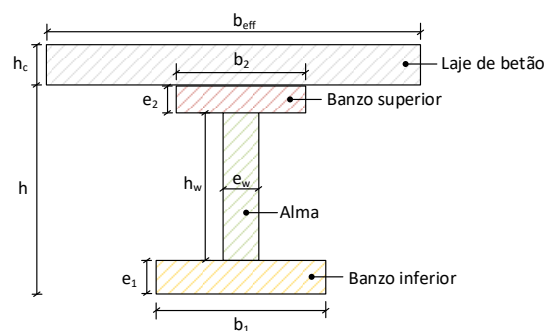


Figura 3.9 - Divisão da secção transversal dos perfis metálicos segundo a EN 1994-1-2 (2008)

Todas as considerações seguintes referem-se a uma análise por elementos e apenas são válidas para a exposição ao fogo padrão.

3.6.1 Perfil metálico sem proteção

O aumento de temperatura para cada parte do perfil de aço sem proteção é calculada pela Expressão (3.8). O fluxo de calor é calculado com base na transferência de calor por convecção e de radiação. O fluxo de convecção determina-se tal como é indicado na Expressão (3.13), o fluxo de radiação pela Expressão (3.14), apenas diferindo na exclusão do fator de vista.

A expressão a considerar para o cálculo do fator de correção do efeito de sombra deve ser a seguinte:

$$K_{sh} = 0,9 \left(\frac{e_1 + e_2 + \frac{1}{2} \cdot b_1 + \sqrt{h_w^2 + 1/4 \cdot (b_1 - b_2)^2}}{h_w + b_1 + 1/2 \cdot b_2 + e_1 + e_2 - e_w} \right) \quad (3.22)$$

3.6.2 Perfil metálico com proteção

A determinação da evolução da temperatura é realizada com a Expressão (3.19), apresentada em 3.5.2., com a diferença de não ser possível prever o tempo de atraso devido à evaporação de água.

Ao contrário da determinação da evolução da temperatura no perfil sem proteção, as expressões deverão ser aplicadas a cada uma das partes do perfil metálico (alma e banzos inferior e superior), correspondendo a cada parte uma determinada massividade. No caso de proteção em caixão considera-se o perfil metálico todo à mesma temperatura, sendo que a massividade a aplicar corresponde a uma proteção em caixão envolvendo a totalidade do perfil.

Em relação às faces expostas ao fogo, e quando são utilizadas lajes maciças, a face superior do banzo superior não está exposta, devendo-se levar isto em conta no cálculo da sua massividade. Quando se utilizam lajes colaborantes em que pelo menos 85% do banzo superior está em contacto com a laje ou quando os vazios existentes entre o banzo superior e a chapa perfilada de aço estão preenchidos com material incombustível, considera-se que este elemento está exposto ao fogo em apenas 3 lados. Para os perfis e chapas colaborantes normalmente utilizados em vigas mistas, raramente esta situação ocorre, pelo que o mais comum é considerar-se a exposição em 4 lados.

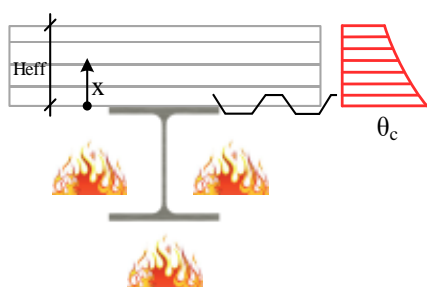
3.6.3 Laje de betão

A EN 1994-1-2 disponibiliza métodos simplificados para determinar a temperatura da laje de betão, da chapa colaborante e das armaduras localizadas nas zonas nervuradas. Um método complexo apresentado baseia-se na determinação de perfis de temperatura, com a definição de linhas isotérmicas (linhas essas que contêm pontos com igual temperatura ao longo da secção de betão).

Em alternativa é apresentado um método em que a laje colaborante é tratada como uma laje maciça, sendo a temperatura em determinado ponto função da distância à face inferior da laje. Este método só é válido para exposição ao fogo padrão e consiste na consulta de valores tabelados apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Distribuição da temperatura do betão em função do afastamento da superfície exposta ao fogo padrão (Gavina (2013))

Esquema da distribuição da temperatura no betão θ_c em °C	X [mm]	Tempo de exposição ao fogo [mín]					
		30	60	90	120	180	240
	5	535	705	-	-	-	-
	10	470	642	738	-	-	-
	15	415	581	681	754	-	-
	20	350	525	627	697	-	-
	25	300	469	571	642	738	-
	30	250	421	519	591	689	740
	35	210	374	473	542	635	700
	40	180	327	428	493	590	670
	45	160	289	387	454	549	645
	50	140	250	345	415	508	550
	55	125	200	294	369	469	520
	60	110	175	271	342	430	495
	80	80	140	220	270	330	395
	100	60	100	160	210	260	305



Esta tabela fornece os valores da temperatura na laje de betão, que podem ser consideradas constantes na largura efetiva da laje, em função do afastamento à face inferior da mesma, e com o fogo a atuar na face inferior. O seu domínio de aplicação limita-se ao betão de massa volúmica normal sem proteção, reservando-se a aplicação da proteção passiva ao elemento metálico. Note-se que nesta tabela é considerada uma espessura efetiva (h_{eff}), sendo este um parâmetro que pretende representar a aproximação de resistência entre uma laje colaborante e uma laje mista. A EN 1994-1-2 (2008) apresenta uma expressão simples para determinar este parâmetro, no entanto e de forma conservativa, optou-se no presente trabalho por considerar que o mesmo equivale à espessura de betão acima da nervura da laje colaborante.

3.6.4 Conectores e armaduras

Quanto aos conectores, a EN 1994-1-2 (2008) estipula que se poderá considerar a sua temperatura em cada instante como 80% da temperatura registada no banzo superior da viga no mesmo período de tempo. Para efeito do cálculo da resistência dos conectores, a temperatura do betão que envolve os mesmos pode ser considerada como 40% da temperatura do banzo superior da viga.

Relativamente às armaduras, a sua temperatura pode ser considerada igual à temperatura do betão ao nível a que as armaduras se encontram.

4 ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MODELO SIMPLIFICADO

Os Eurocódigos relativos aos materiais estruturais em situação de incêndio tratam essencialmente das diferenças nas metodologias de cálculo aplicadas à temperatura ambiente e à temperatura elevada. A aplicação das partes 1-2 dos Eurocódigos não dispensa a consulta e conhecimento das respetivas partes 1-1, pelo que os métodos de cálculo prescritos para a temperatura ambiente apenas serão abordados quando considerado essencial.

Para as estruturas metálicas, para além da classificação da secção, serão abordados os dois métodos alternativos de análise dentro do modelo de cálculo simplificado indicado pela EN 1993-1-2 (2009), incidindo-se mais nos seus princípios e procedimentos inerentes à sua aplicação, com menor destaque para a formulação de cálculo.

Quanto às vigas mistas não revestidas de betão, será abordado para além da classificação da secção e do conceito de largura efetiva, apenas um método de análise, sendo este baseado na teoria da plasticidade com redução das propriedades mecânicas dos materiais. No caso destes elementos é realizada uma explicação mais detalhada dos métodos e formulação de cálculo adoptados no presente trabalho.

4.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

A EN 1993-1-2 (2009) refere dois métodos para determinação da resistência estrutural em situação de incêndio. O primeiro é o método no domínio da resistência, em que para uma dada distribuição da temperatura na secção transversal do elemento se determina a sua capacidade resistente com base numa redução das propriedades mecânicas do material. O segundo método é o método no domínio da temperatura, e envolve a determinação da temperatura a partir da qual o elemento deixa de verificar os critérios de segurança estrutural em função de um grau de utilização.

Antes da abordagem das duas metodologias de cálculo será explicada a forma de classificação das secções, a qual tem repercussão na avaliação da capacidade resistente dos elementos metálicos.

4.1.1 Classificação das secções

A classificação das secções é de extrema importância, uma vez que os elementos metálicos apresentam geralmente secções esbeltas potencialmente causadoras de fenómenos de encurvadura local, as quais podem levar a que o colapso ocorra antes de ser atingida a tensão de cedência do material. Assim sendo, a EN 1993-1-1 (2009) estipula que as secções devem ser classificadas de acordo com os esforços atuantes,

a sua geometria e o parâmetro ε . O parâmetro ε pode ser determinado pela seguinte expressão (Franssen e Vila Real, 2010):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \times \sqrt{\frac{E}{210000}} \quad (4.1)$$

em que f_y é a tensão de cedência do aço [MPa] e E é o módulo de elasticidade [MPa].

No caso do aço o módulo de elasticidade é considerado constante à temperatura ambiente, podendo-se simplificar a expressão anterior para:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.2)$$

Em situação de incêndio tanto o módulo de elasticidade como a tensão de cedência são reduzidos por um fator de redução que é mais gravoso quanto maior for a temperatura. Assim e aplicando os referidos fatores de redução respetivos, $K_{E,\theta}$ e $K_{y,\theta}$, resulta:

$$\varepsilon_\theta = \sqrt{\frac{235}{f_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{E_\theta}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{K_{y,\theta} f_y}} \sqrt{\frac{K_{E,\theta} E}{210000}} = \sqrt{\frac{K_{E,\theta}}{K_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.3)$$

A EN 1993-1-2 adota esta expressão para a determinação do parâmetro ε_θ , simplificando-a conforme apresentado em seguida:

$$\varepsilon_\theta = \sqrt{\frac{K_{E,\theta}}{K_{y,\theta}}} \sqrt{\frac{235}{f_y}} \approx 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.4)$$

Esta simplificação envolve a aproximação da relação entre o fator de redução do módulo de elasticidade e o fator de redução da tensão de cedência.

Assim, a única diferença entre a classificação das secções à temperatura ambiente e em situação de incêndio é a afetação das propriedades mecânicas pelo coeficiente redutor de 0,85, sendo o método de classificação proposto na EN 1993-1-2 (2009) independente da temperatura que o elemento apresenta num dado instante e consequentemente invariável durante o período de exposição ao fogo.

4.1.2 Análise no domínio da resistência

A análise no domínio da resistência baseia-se na aplicação do critério de aceitação da Expressão (3.2), (Secção 3.1). Em situação de incêndio o valor do coeficiente parcial de segurança das propriedades resistentes dos materiais $\gamma_{M,fi}$ é unitário.

A resistência em situação de incêndio deve ter em conta os fatores de redução das propriedades mecânicas do aço, correspondentes à temperatura que o elemento apresenta no instante de tempo t . Isto significa que por este método a determinação das necessidades de proteção de um elemento metálico segue um procedimento iterativo de cálculo.

Quando a análise é realizada ao nível da secção na determinação da capacidade resistente, o Eurocódigo fornece expressões para as distribuições uniformes e não uniformes de temperatura. Em ambos os casos devem ser aplicados os coeficientes de redução da tensão de cedência do aço. Com uma distribuição não uniforme de temperatura o cálculo pode ser feito pelo somatório da contribuição das áreas com temperaturas diferenciadas.

Quando a análise é feita ao nível do elemento, para além da redução da tensão de cedência deve ser contabilizada a redução do módulo de elasticidade, tendo como consequência que nas situações de instabilidade estrutural não existe relação linear entre a temperatura e a capacidade resistente.

Destacam-se também outras diferenças relativamente ao cálculo preconizado pela EN 1993-1-1 (2009), no que diz respeito a fenómenos de encurvadura por compressão e de encurvadura lateral. Em situação de incêndio e consoante o fenómeno, são aplicadas curvas de encurvadura diferentes, sendo o fator de imperfeição (α) invariável com a geometria do elemento e calculado através da expressão seguinte:

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} \quad (4.5)$$

O valor deste fator em situação de incêndio é tipicamente superior ao valor em condições de temperatura ambiente, com exceção dos casos em que a curva de encurvadura é do tipo d . O aumento do fator α aliado à redução do módulo de elasticidade dá ainda maior relevância aos fenómenos de encurvadura em elementos expostos à ação do fogo.

No caso da encurvadura por compressão, a EN 1993-1-2 (2009) estipula que o comprimento de encurvadura (l_{fi}) de um pilar em situação de incêndio deve ser igual ao adotado para a análise sob temperatura normal. No entanto num pórtico contraventado os pilares com continuidade aos quais corresponda um comprimento de encurvadura igual à distância entre pisos poderá considerar-se metade desse valor. Esta opção deve-se ao fato de em situação de incêndio nos pisos onde os tramos dos pilares estão submetidos à ação do fogo, haver uma redução do módulo de elasticidade, diminuindo a rigidez desse tramo de pilar face aos tramos adjacentes. Como tal, e desde que a resistência ao fogo dos elementos que separam os compartimentos de incêndio não seja inferior à resistência ao fogo do pilar, a diferença na rigidez que se verifica entre elementos permite considerar o tramo como encastrado.

Na Tabela 4.1 destacam-se as verificações presentes na EN 1993-1-1 (2009) que não são abordadas na correspondente norma para situação de incêndio.

Tabela 4.1 - Verificações de segurança em estruturas metálicas não contempladas na EN 1993-1-1 (2009) para situações de incêndio

Ao nível da secção	Ao nível do elemento
<ul style="list-style-type: none"> • Compressão; • Flexão desviada; • Torção; • Flexão com esforço transversal; • Flexão composta com esforço transversal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Encurvadura por esforço transversal em almas sem reforços intermédios; • Torção; • Combinação flexão com torção.

Em (Franssen e Vila Real, 2010) são apresentados os procedimentos de cálculo para efetuar estas verificações em situação de incêndio, e que se baseiam na adaptação das fórmulas utilizadas à temperatura ambiente utilizando os valores das propriedades dos materiais reduzidas.

4.1.3 Análise no domínio da temperatura

Este método baseia-se na determinação da temperatura que conduz à situação de colapso do elemento em função do seu grau de utilização. Trata-se de um método com um campo de aplicação mais reduzido, sendo aplicável apenas para distribuições uniformes de temperatura na secção transversal de um elemento e para elementos não suscetíveis a fenómenos de encurvadura.

O grau de utilização (μ_0) pode ser definido como o rácio entre os esforços atuantes determinados para a situação de incêndio ($E_{fi,d}$) e a capacidade resistente do elemento em situação de incêndio mas para o instante de tempo inicial ($R_{fi,d,0}$), em que o elemento se encontra à temperatura ambiente.

A expressão indicada na EN 1993-1-2 para a determinação da temperatura crítica do elemento sob um determinado tipo de solicitação é dada pela expressão seguinte:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (4.6)$$

Onde,

$\theta_{a,cr}$ - Temperatura crítica do elemento para o tipo de solicitação em análise;

μ_0 - Grau de utilização para o instante = 0s ($\mu_0 \geq 0,013$).

No caso de elementos sujeitos a fenómenos de encurvadura, como elementos em compressão ou sujeitos a encurvadura lateral este processo pode ser utilizado de forma iterativa.

Salienta-se ainda que o Anexo Nacional da EN 1993-1-2 (2009) estipula que no caso de não ser efetuado o cálculo da temperatura crítica, devem ser considerados os seguintes limites para elementos das classes 1, 2 e 3:

- Elementos tracionados e vigas em que a encurvadura lateral não é um potencial modo de colapso: 540 °C para todas as categorias de edifícios, exceto os destinados a armazenamento, e 525 °C para os edifícios, exceto os destinados a armazenamento.
- Para todas as outras situações e em particular para elementos suscetíveis de fenómenos de instabilidade é 500 °C.

4.2 VIGAS MISTAS

Relativamente às vigas mistas constituídas por perfil metálico sem revestimento de betão, a EN 1994-1-2 estipula que devem ser feitas as verificações em situação de incêndio, indicadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Verificações de segurança a efetuar em vigas mistas constituídas por perfil metálico sem revestimento de betão segundo a EN 1994-1-2

Ao nível da secção	Ao nível do elemento
Resistência à flexão; Resistência à flexão com esforço transversal; Resistência ao esforço transversal; Resistência ao corte longitudinal na laje de betão.	Encurvadura por esforço transversal; Resistência da conexão.

O presente trabalho focou-se essencialmente na parte metálica da estrutura, pelo que não será detalhada a verificação ao corte longitudinal da laje de betão. O betão é menos afetado numa situação de incêndio do que a parte metálica, uma vez que o aumento de temperatura no betão é substancialmente inferior.

Analisando a lista de verificações a efetuar, constata-se que a EN 1994-1-2 (2008) exclui a encurvadura lateral da lista de fenómenos relevantes para a verificação da segurança em situação de incêndio. Nestes elementos pode-se considerar que o banzo superior está travado pela laje na presença de momentos positivos, e nas zonas de momentos negativos em zonas de apoios com continuidade, o gradiente desses momentos é geralmente muito elevado, sendo diminuto o comprimento da viga sujeito a este fenómeno de encurvadura (Lennon et al. (2007)).

Para a análise estrutural de vigas mistas seguindo o modelo de cálculo simplificado, existem duas metodologias, a primeira utilizando o método no domínio da resistência e o segundo com recurso ao método no domínio da temperatura. No presente trabalho apenas é abordado o primeiro método.

O método pelo domínio da resistência assenta na teoria da plasticidade, apresentando limitações nas várias verificações a efetuar, nomeadamente no que diz respeito à classificação da classe da secção mista. Para além desse aspeto destaca-se a determinação da largura efetiva. Embora não haja alterações para a situação de incêndio, devido à sua importância no controlo da capacidade resistente, é feita uma breve descrição deste parâmetro sem no entanto apresentar a sua formulação de cálculo.

4.2.1 Classe da secção e largura efetiva

Os critérios de classificação da secção mista definidos na EN 1994-1-1 (2009) mantêm-se válidos para a situação de incêndio, devendo-se naturalmente efetuar a classificação dos banzos e da alma do perfil de acordo com a EN 1993-1-2 (2009).

A determinação da largura efetiva (b_{eff}) não apresenta qualquer alteração relativamente ao estipulado para condições de temperatura ambiente, sendo essencial caracterização do comportamento misto da viga. A largura efetiva pode ser determinada de acordo com a secção (5.4.1.2) da EN 1994-1-1 (2009).

4.2.2 Resistência ao corte dos conetores

Para que haja a garantia da transmissão do esforço de corte rasante entre o perfil metálico e a laje de betão é fundamental a determinação da resistência ao corte dos conetores a temperatura elevada.

A EN 1994-1-2 (2008) estipula que essa resistência ao corte em situação de incêndio ($P_{fi,Rd}$), para lajes maciças e colaborantes, deve ser calculada utilizando os valores obtidos para condições de temperatura ambiente, afetados dos fatores de redução do aço e betão, tal como indicado na expressão:

$$P_{fi,Rd} = \min \begin{cases} P_{fi,Rd,aço} = 0,8 \cdot K_{u,\theta} \cdot P_{Rd,aço} \\ P_{fi,Rd,betão} = K_{c,\theta} \cdot P_{Rd,betão} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde,

$K_{u,\theta}$ - fator de redução da tensão última resistente do aço estrutural do conector (considera-se de comportamento igual sob temperaturas elevadas ao aço do perfil metálico);

$P_{Rd,aço}$ - resistência ao corte do conector em aço para estado limite último;

$K_{c,\theta}$ - fator de redução da tensão resistente à compressão do betão;

$P_{Rd,bet\tilde{a}o}$ - resist\~encia por esmagamento do bet\~ao para estado limite \~ultimo.

A resist\~encia de c\~alculo do corte do conector e do esmagamento do bet\~ao, em vigas mistas com lajes maci\~cas, deve ser feito de acordo com as seguintes express\~oes indicadas na EN 1994-1-1 (2009):

$$P_{Rd,a\~c\~o} = \frac{0,8 f_u \pi d^2 / 4}{\gamma_V} \quad (4.8)$$

$$P_{Rd,bet\tilde{a}o} = \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_V} \quad (4.9)$$

onde,

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \quad \text{para } 3 \leq h_{sc}/d \leq 4$$

$$\alpha = 1 \quad \text{para } h_{sc}/d > 4$$

em que:

f_u - tens\~ao \~ultima resistente do a\~o do conector;

d - di\~ametro da espiga do conector;

γ_V - coeficiente parcial de seguran\~ca cujo valor recomendado pela EN 1994-1-1 (2009) \~e 1,25, devendo em situa\~ao de inc\~endio ser substituido por 1,0;

f_{ck} - valor da tens\~ao resistente caracteristica \~a compress\~ao do bet\~ao;

E_{cm} - m\~odulo de elasticidade secante do bet\~ao.

\~E interessante verificar que tanto para a resist\~encia ao corte do conector como para a resist\~encia por esmagamento do bet\~ao, considera-se, que na situa\~ao de inc\~endio enquanto as temperaturas atingidas n\~ao geram a redu\~cao das propriedades mec\~nicas dos materiais existe um aumento da capacidade resistente pela altera\~ao dos coeficientes parciais de seguran\~ca. No entanto, para o caso do corte dos conectores, apesar de se substituir o coeficiente de redu\~cao 1/1,25 por 1, acrescenta-se a afeta\~ao do fator 0,8 que \~e numericamente igual a 1/1,25. Desta forma, em situa\~ao de inc\~endio o modo de rotura para a conex\~ao que em estado limite \~ultimo ocorre pelo esmagamento do bet\~ao, pode passar a ocorrer pelo corte no a\~o do conector. Para al\~em disso, como a redu\~cao das propriedades do a\~o \~e mais r\~apida do que no bet\~ao, devido ao melhor comportamento t\~ermico do bet\~ao, o modo de rotura condicionante para a resist\~encia da conex\~ao com o aumento do tempo de exposi\~ao ao fogo ser\~a tendencialmente o corte do a\~o do conector.

Ainda relativamente à resistência ao corte dos conectores em estado limite último, deve-se referir que quando a laje de betão é colaborante, a resistência em estado limite último para as lajes maciças deve ser afetada de coeficientes de redução. Nas zonas nervuradas, onde se encontram os conectores, existe uma menor quantidade de betão envolvente e uma diferente distribuição das forças nos conectores, tal como ilustra a Figura 4.1.

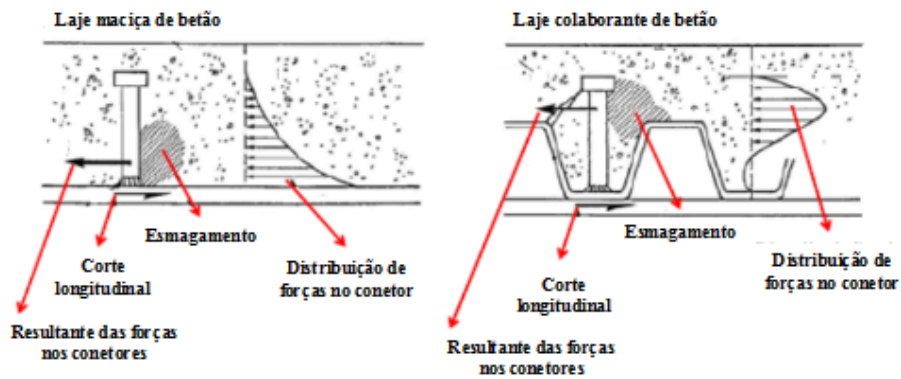


Figura 4.1 - Distribuição de tensões nos conectores (adaptado de Salvado Ferreira (2012))

Para atender a esta redução da força, a EN 1994-1-1 (2009) indica as Expressões (4.10) e (4.11) para a determinação do coeficiente de redução para nervuras paralelas à viga metálica (K_l) e do coeficiente de redução para nervuras perpendiculares à viga metálica (K_t), respetivamente.

$$k_l = 0,6 \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \leq 1,0 \quad (4.10)$$

onde,

b_0 ; h_{sc} e h_p são as dimensões indicadas na Figura 4.3.

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (4.11)$$

onde,

b_0 ; h_{sc} e h_p são as dimensões indicadas na Figura 4.2;

n_r número de conectores numa nervura na interseção com a viga (≤ 2).

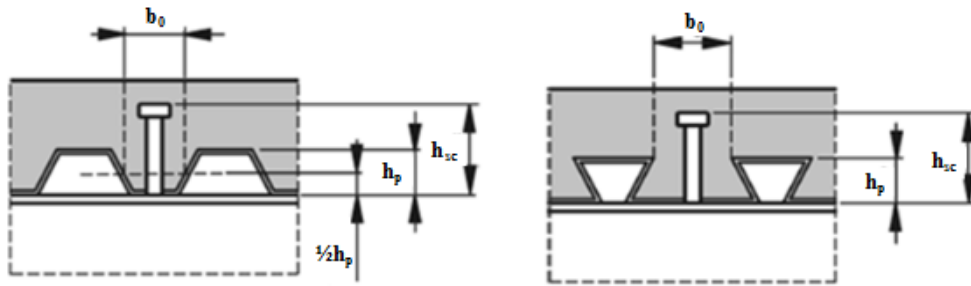


Figura 4.2 - Parâmetros geométricos para a determinação do coeficiente de redução da resistência dos conectores para nervuras perpendiculares à viga mista (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))

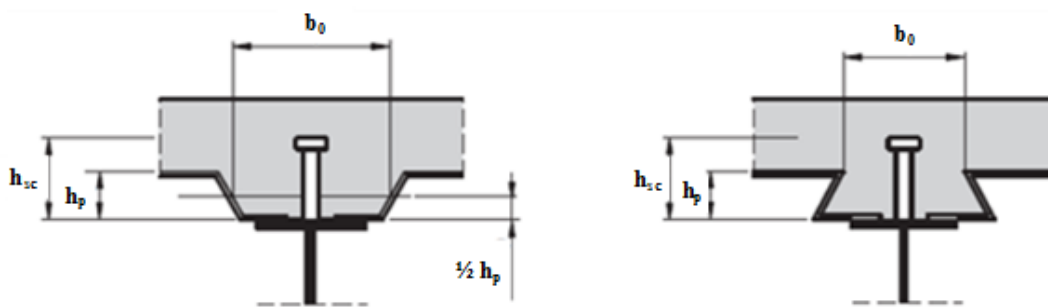


Figura 4.3 - Parâmetros geométricos para determinação do coeficiente de redução da resistência dos conectores para nervuras paralelas à viga (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))

A EN 1994-1-1 (2009) estipula ainda os limites apresentados na Tabela 4.3, para a redução da resistência da conexão quando as nervuras são perpendiculares às vigas, sendo estes função do número de conectores por fila, do diâmetro do conector e do método de execução dos conectores (soldados através da chapa colaborante ao perfil ou soldados ao perfil e com a chapa colaborante furada).

Tabela 4.3- Limites para os coeficientes de redução da resistência dos conectores com nervuras perpendiculares às vigas (adaptado da EN 1994-1-1 (2009)).

Número de conectores por nervura (n_r)	Espessura da chapa t [mm]	Conectores de diâmetro não superior a 20 mm e soldados através das chapas perfiladas de aço	Chapas perfiladas furadas e conectores com diâmetros de 19 mm ou 22 mm
1	$\leq 1,0$	0,85	0,75
	$> 1,0$	1,00	0,75
2	$\leq 1,0$	0,70	0,60
	$> 1,0$	0,80	0,60

4.2.3 Efeito da conexão parcial

De acordo com a EN 1994-1-2 (2008) o efeito da conexão parcial pode ser levado em consideração no comportamento à flexão da viga em particular na determinação dos valores dos momentos positivos e negativos. No entanto, na norma não é apresentado qualquer método para a quantificação do grau de conexão e a sua influência na determinação da resistência à flexão da secção, pelo que se adotou o estipulado na EN 1994-1-1 (2009), considerando as propriedades dos materiais em situação de incêndio.

O valor de cálculo do momento resistente de uma secção mista está diretamente relacionado com o número de conetores existentes num determinado comprimento crítico e com a respetiva força resistente ao corte. Este comprimento crítico é o comprimento entre secções críticas, definidas pela EN 1994-1-1 (2009) como:

- secções de momento fletor máximo;
- apoios;
- secções sujeitas a cargas concentradas ou reações;
- zonas de mudança brusca da secção transversal.

A resistência da conexão ao longo do comprimento crítico limita a força de compressão no banzo de betão. Numa análise plástica da secção mista, a força de compressão no banzo de betão depende da posição do eixo neutro, a qual por sua vez, no caso de solicitações que geram momentos positivos é função da relação entre a força máxima de tração no perfil metálico (R_a) e a força máxima de compressão no betão (R_c), tal como ilustrado na Figura 4.4.

Pelo equilíbrio interno de forças, caso $R_c \geq R_a$ o eixo neutro plástico (LN_{pl}) estará localizado no banzo de betão e a força de compressão existente no mesmo (N_{cf}) será igual a R_a . Já quando $R_a > R_c$ o eixo neutro plástico estará localizado no perfil metálico, passando N_{cf} a ser igual a R_c . Em ambos os casos, a força de compressão existente no banzo de betão é igual ao menor valor entre R_a e R_c .

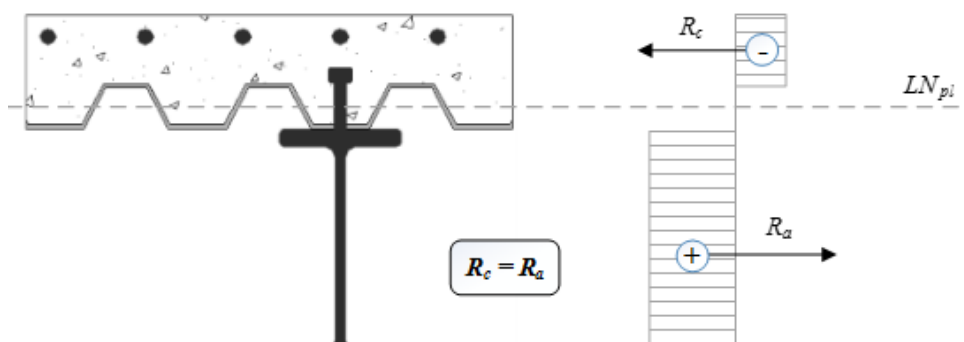


Figura 4.4 - Equilíbrio de forças em vigas mistas segundo o cálculo orgânico e pela teoria da plasticidade

Quando a resistência da conexão ao longo da secção (N_c), igual ao número de conetores no comprimento critico vezes a força resistente ao corte dos mesmos, é inferior a N_{cf} , implica que essa força de compressão não poderá existir no betão, estando neste caso limitada ao valor da resistência da conexão. Esta será uma situação de conexão parcial.

O grau de conexão (η) pode ser determinado pela seguinte Expressão:

$$\eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (4.12)$$

A Figura 4.5 representa a influência da variação do grau de conexão no momento fletor resistente, determinado pelo cálculo orgânico segundo a teoria da plasticidade.

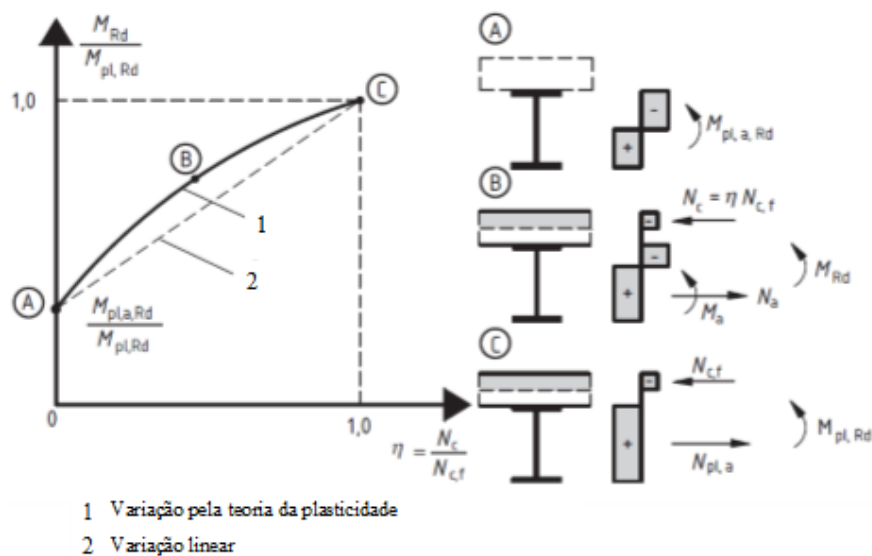


Figura 4.5 - Variação da capacidade resistente de uma viga mista em função do grau de conexão (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))

No caso A, em que a conexão entre o perfil metálico e a laje de betão é nula, não existe o contributo da laje sendo o momento resistente igual ao momento plástico resistente do perfil metálico. No caso C, em que existe conexão total, o momento resistente é igual ao momento resistente plástico da secção mista, não havendo limitação no contributo do banzo de betão.

Nos casos intermédios, representados pelo cenário B, existe uma limitação na força de compressão na laje, originando-se um eixo neutro na laje ($LN_{pl,c}$) e um outro eixo neutro no perfil ($LN_{pl,a}$), estando esta situação representada na Figura 4.6.

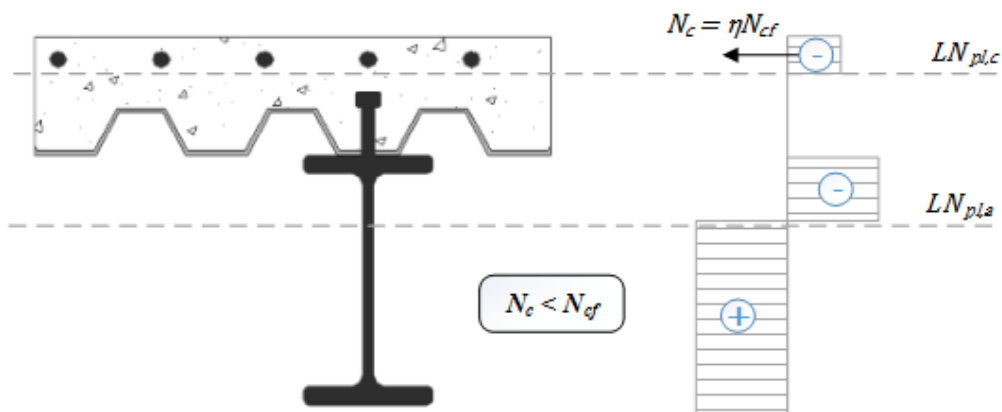


Figura 4.6 - Exemplo de equilíbrio de forças em vigas mistas com conexão parcial segundo o cálculo orgânico e pela teoria da plasticidade

Existem limitações na consideração dos efeitos de conexão parcial:

- 1) Uma viga mista apenas poderá ser dimensionada em conexão parcial se a ligação ao corte longitudinal for dúctil. De outra forma ocorreria uma rotura frágil quando a força de compressão no banzo de betão igualasse ou superasse a resistência da conexão. Com uma conexão dúctil deixa de haver um funcionamento totalmente monolítico, estando indicados na EN 1994-1-1 (2009) os critérios que conduzem a essa ductilidade.
- 2) Impossibilidade da consideração da conexão parcial em zonas de momentos negativos. Tanto na EN 1994-1-1 (2009) como em (Calado e Santos (2010)) é referido que a conexão parcial só é permitida para momento positivos, obrigando a que a conexão tenha resistência suficiente para que a armadura existente no banzo de betão plastifique em tração, sendo este um pressuposto assumido para que seja válida a aplicação do cálculo orgânico pela teoria da plasticidade. A justificação para que na zona de momentos negativos não seja permitida a conexão parcial pode ser atribuída a diversos motivos (Calado e Santos (2010)):
 - O momento fletor pode ser maior do que o previsto, nos casos em que o betão ainda não está fendilhado;
 - O endurecimento do aço à tração pode aumentar o valor do momento fletor;
 - O valor da tensão de cedência das armaduras pode ser maior do que o respetivo valor de cálculo;
 - Verificou-se em alguns ensaios experimentais e para grandes curvaturas a ocorrência de endurecimento do aço das armaduras.

- 3) Para valores pequenos do grau de conexão a variação do momento resistente da secção mista, expressa na Figura 4.5 deixa de ser válida. Segundo Calado e Santos (2010) isto deve-se ao elevado escorregamento que ocorre entre a laje e o perfil de aço para graus de conexão diminutos, dando-se com isso a rotura pelos conetores. A EN 1994-1-2 (2008) impõe que o grau de conexão mínimo em vigas mistas seja igual ou superior a 40%.

4.2.4 Resistência da secção ao esforço transversal

Relativamente ao esforço transversal a EN 1994-1-2 (2008) indica que poderão ser utilizadas as prescrições de cálculo da EN 1994-1-1 (2009) com base na substituição de parâmetros indicada na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Parâmetros a substituir nas expressões de cálculo da EN 1994-1-1 (2009) referentes ao esforço transversal para a situação de incêndio

A resistência plástica ao esforço transversal em secções mistas é considerada igual à resistência da secção de aço ($V_{pl,a,Rd,fi}$). A inclusão do betão armado para efeitos da determinação da capacidade resistente terá de ser justificada.

No presente trabalho efetuou-se o cálculo da resistência ao esforço transversal atendendo apenas à área da alma do perfil metálico, conforme indicado na EN 1993-1-1, aplicando-se no entanto o fator η na determinação da área resistente, seguindo também as indicações da EN 1993-1-5 (2009):

$$V_{pl,a,Rd,fi} = \frac{\eta h_w t_w (f_{a,y\theta} / \sqrt{3})}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.13)$$

em que η toma um valor igual a 1.2 para classes de aço até S460 (EN 1993-1-5).

4.2.5 Resistência da secção à flexão

A EN 1994-1-2 (2008) fornece um método de cálculo para determinação do momento resistente à flexão que atende aos efeitos da temperatura na redução das propriedades dos materiais. Este método é baseado na teoria da plasticidade e é válido para todas as classes de secções com exceção da classe 4. No entanto, as expressões fornecidas apenas são válidas para os casos em que o eixo neutro está localizado na laje de betão, sendo dada a indicação de que poderá ser utilizado um método semelhante para outras posições do eixo neutro.

A distribuição de tensões na secção da viga mista em condições normais de temperatura, segue o esquema representado na Figura 4.8, podendo por vezes variar a tensão resistente entre os banzos e a alma como sucede com os perfis reconstituídos soldados (PRS) constituídos por diferentes tipos de aço na alma e banzos.

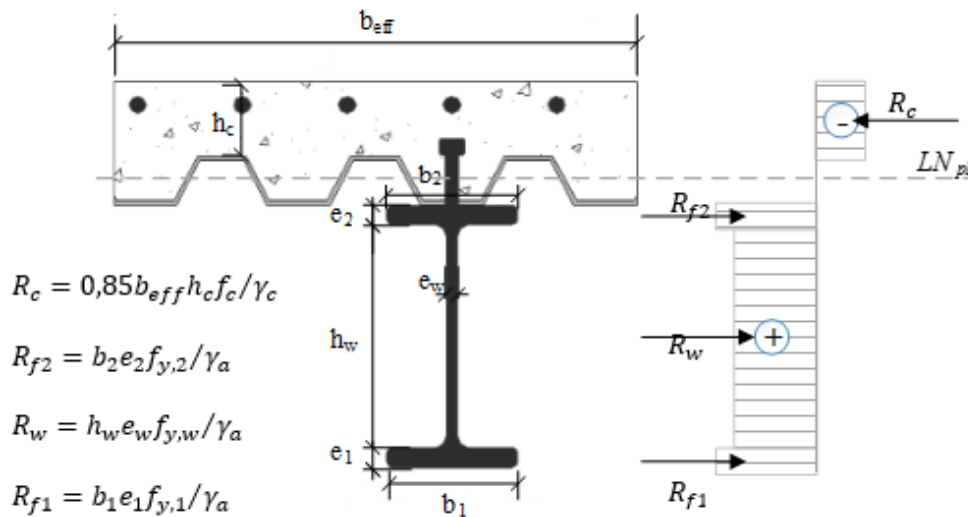


Figura 4.8 - Distribuição de tensões numa viga mista em condições de temperatura ambiente com perfil metálico do tipo PRS

Em vigas mistas, existe uma diferenciação entre a alma e os banzos, considerando-se que a elevação da temperatura ocorre de forma diferenciada de acordo com a massividade e as condições de exposição ao fogo destes elementos. Por outro lado, na laje de betão não é fidedigno assumir-se uma distribuição uniforme de temperatura na secção transversal. Como tal, deve ser consultada a tabela fornecida pela EN 1994-1-2 (2008) que indica as isotérmicas de acordo com a exposição ao fogo padrão. Tendo em conta esta distribuição, deve ser identificada a camada de betão com temperatura inferior a 250 °C, podendo considerar-se que não está sujeita a uma redução de propriedades e como tal apresenta uma tensão uniforme segundo o bloco retangular de tensões. Para a zona de betão comprimida com temperatura superior a 250 °C deve ser considerada uma diminuição da resistência do betão por camadas de 10 mm

de espessura, assumindo-se uma temperatura média para a mesma em consonância com a referida tabela.

A distribuição de tensões em situação de incêndio passa então a ter a forma representada na Figura 4.9.

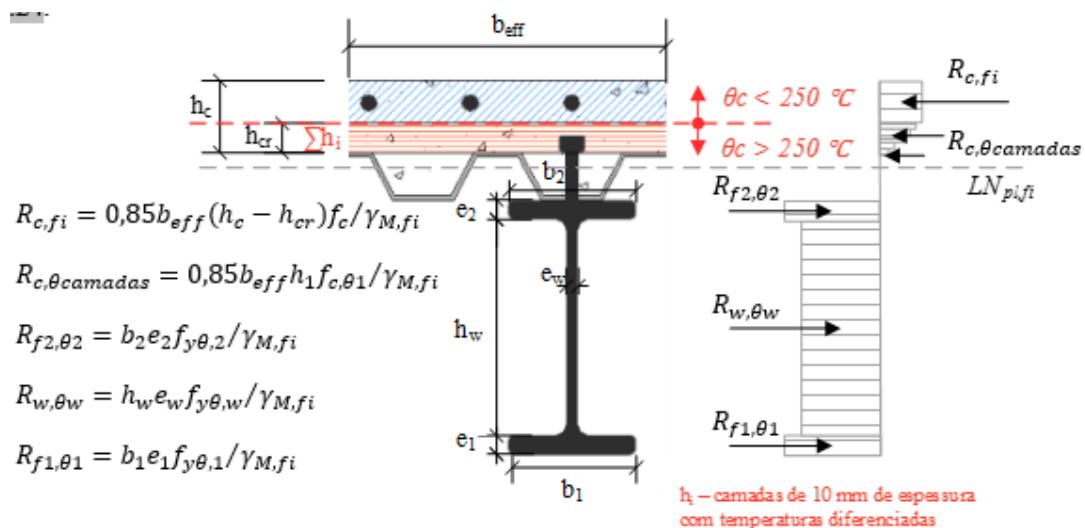


Figura 4.9 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio

A distribuição não uniforme da tensão resistente do betão é representativa do comportamento de uma secção mista para um dado instante de exposição ao fogo, na situação em que existe o equilíbrio interno de forças entre o betão e o aço, resultando a localização do eixo neutro plástico na zona nervurada da laje de betão. No entanto o processo de análise ao fogo não é estacionário no tempo, tendo por isso de ser realizada uma análise da variação da posição do eixo neutro com o tempo de exposição ao fogo e da capacidade resistente. Este processo será incremental, com a determinação em cada instante das temperaturas diferenciadas nos vários elementos, resultando na diminuição das propriedades resistentes dos materiais e variação do posicionamento do eixo neutro e da capacidade resistente da secção mista.

Em seguida serão apresentadas as expressões de cálculo para determinação da capacidade resistente à flexão a momentos positivos e negativos para diferentes localizações do eixo neutro.

a) Resistência a momentos positivos

Na Figura 4.10 é apresentado um esquema genérico com a legenda dos principais parâmetros intervenientes nas expressões do cálculo orgânico.

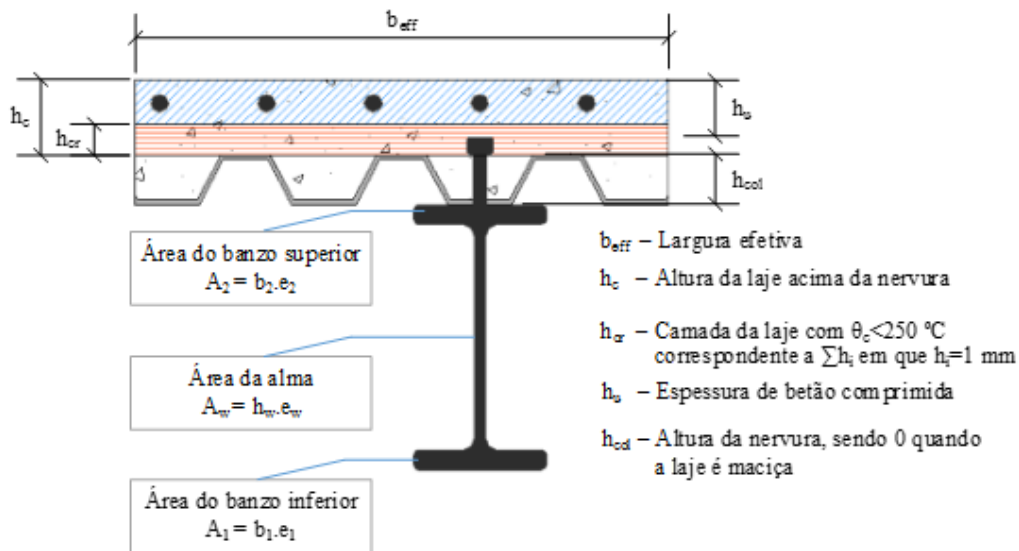


Figura 4.10 - Esquema de uma viga mista com identificação dos parâmetros mais relevantes para o cálculo da resistência a momentos positivos

No cálculo orgânico de vigas mistas para momentos positivos em lajes nervuradas e apenas foi considerada a parte maciça da laje na determinação da capacidade resistente à flexão da secção mista. Para além disso não foi levada em conta a armadura na zona do betão à compressão, o contributo da chapa colaborante, e o eventual contributo do betão da laje à tração.

Para determinar a posição do eixo neutro é necessário calcular a força máxima de tração no perfil metálico ($R_{a,fi}$), a força máxima de compressão no betão ($R_{c,fi}$) e a resistência ao corte da conexão ao longo do comprimento crítico até à secção considerada (N_c), indicando-se em seguida as expressões para o efeito:

$$R_{a,fi} = f_{y,\theta 1} A_1 + f_{y,\theta w} A_w + f_{y,\theta 2} A_2 \quad (4.14)$$

$$N_c = n_r L_{cr} P_{Rd,fi} \quad (4.15)$$

$$R_{c,fi} = 0,85 f_c b_{eff} (h_c - h_{cr}) + \sum_i^{h_{cr}} 0,85 f_{c,\theta} b_{eff} \cdot h_i \cdot E^{-3} \quad (4.16)$$

onde,

$f_{y,\theta 1}$ - tensão de cedência reduzida no banzo inferior para temperatura atingida no instante t ;

$f_{y,\theta w}$ - tensão de cedência reduzida na alma para temperatura atingida no instante t ;

$f_{y,\theta 2}$ - tensão de cedência reduzida no banzo superior para temperatura atingida no instante t ;

n_r - número de conectores por secção transversal;

L_{cr} - comprimento crítico;

f_c - tensão resistente à compressão do betão para temperatura ambiente;

$f_{c,\theta}$ - tensão resistente à compressão do betão para temperatura atingida na camada i para o instante t .

Recorde-se que $R_{c,fi}$ está limitado a N_c em situação de conexão parcial, ou seja:

$$\text{se } \eta = \frac{N_c}{\min\{R_{a,fi}, R_{c,fi}\}} < 1 \Rightarrow R_{c,fi} = N_c \quad (4.17)$$

Neste caso a espessura de betão comprimida (h_u) é determinada em função desta limitação e da variação da tensão resistente do betão em zonas com temperatura superior a 250 °C.

Em seguida apresentam-se as expressões de cálculo para determinação da capacidade resistente à flexão a momentos positivos em situação de incêndio, quando o eixo neutro encontra-se localizado na alma do perfil metálico.

Quando a força máxima de tração no perfil é superior à força máxima de compressão no betão, o eixo neutro pode ficar localizado na alma. Isto acontece quando a força resistente à tração do banzo inferior somada à força resistente à tração da alma, é superior à força de compressão máxima no betão. Neste caso a distribuição de tensões na secção transversal será similar à apresentada na Figura 4.11.

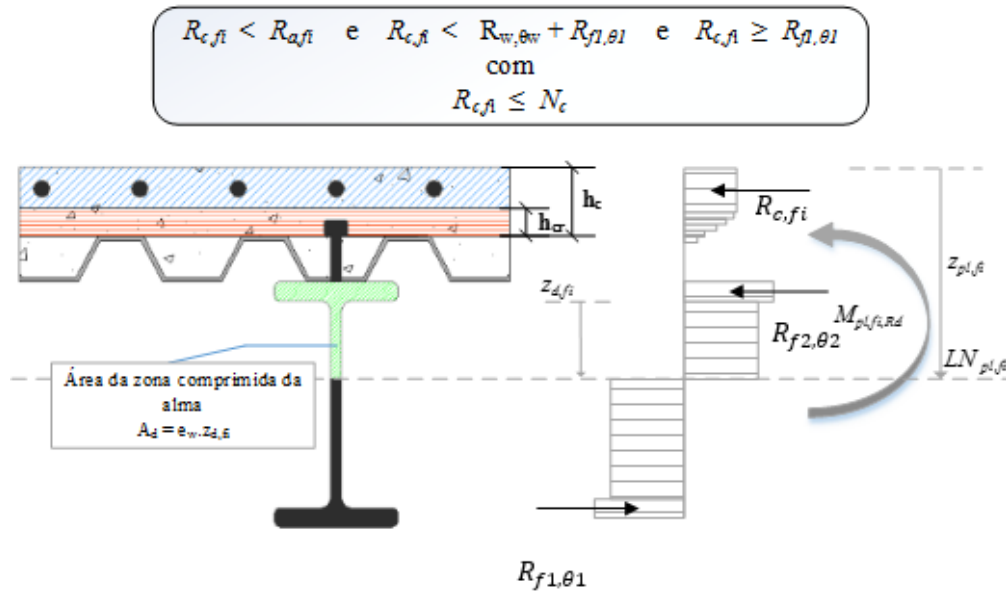


Figura 4.11 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio aplicando os princípios da teoria da plasticidade e segundo o método de cálculo simplificado admitindo o eixo neutro localizado na alma do perfil

O posicionamento do eixo neutro plástico na alma do perfil metálico pode ser determinado pelo equilíbrio interno das forças resistentes, de acordo com a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \sum F = 0 & \Leftrightarrow R_{a,fi} - R_{f2,\theta2} - f_{y,\theta w} A_d = R_{c,fi} + R_{f2,\theta2} + f_{y,\theta w} A_d \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow f_{y,\theta w} A_d = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{c,fi}}{2} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow f_{y,\theta w} e_w z_{d,fi} = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{c,fi}}{2} \Leftrightarrow \quad (4.27) \\ & \Leftrightarrow z_{d,fi} = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{c,fi}}{2f_{y,\theta w} e_w} \frac{h_w}{h_w} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow z_{d,fi} = \frac{(R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{c,fi})h_w}{2R_{f w,\theta w}} \end{aligned}$$

A capacidade resistente à flexão para momentos positivos, quando o eixo neutro plástico está localizado na alma do perfil pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} M_{Pl,fi,Rd} &= f_{y,\theta1} A_1 \left[\frac{e_1}{2} + (h_w - z_{d,fi}) \right] + \\ &+ f_{y,\theta w} e_w (h_w - z_{d,fi}) \left(\frac{h_w - z_{d,fi}}{2} \right) + \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned}
& +f_{y,\theta 2}A_2(e_2 + z_{d,fi}) + \\
& +f_{y,\theta w}e_w h_d \left(\frac{z_{d,fi}}{2}\right) + \\
& +0,85f_c b_{eff}(h_c - h_{cr}) \left(\frac{h_c - h_{cr}}{2} + h_{cr} + h_{col} + e_2 + z_{d,fi}\right) + M_{fi,Rd,camadas}
\end{aligned}$$

onde,

$$\begin{aligned}
M_{fi,Rd,camadas} = \\
\sum_{i=1}^{h_{cr}} 0,85f_{c,\theta} b_{eff,i} \cdot E^{-3} [h_c - h_{cr} - i \cdot E^{-3} + 0,5 \cdot E^{-3} + h_{col} + e_a + h_d]
\end{aligned} \tag{4.29}$$

As restantes situações de localização do eixo neutro são detalhadas em Gavina (2013).

b) Resistência a momentos negativos

Na Figura 4.12 é apresentado um esquema genérico com a legenda dos principais parâmetros intervenientes nas expressões do cálculo orgânico. Neste cálculo foram utilizados os mesmos pressupostos dos momentos positivos.

No caso dos momentos negativos, mais uma vez apenas se considerou a parte maciça da laje de betão, desprezando-se o seu contributo à tração. Não foi permitida a conexão parcial na ferramenta desenvolvida, obrigando a que a resistência da conexão seja sempre suficiente para garantir a conexão total, mesmo com a evolução da temperatura. Este foi então considerado como um critério para a obtenção das temperaturas críticas e respetivas necessidades de proteção. Isto significa que a partir do momento em que a conexão deixa de ser total, a temperatura dos elementos é aquela que apenas pode ser atingida quando findado o tempo requerido de resistência ao fogo.

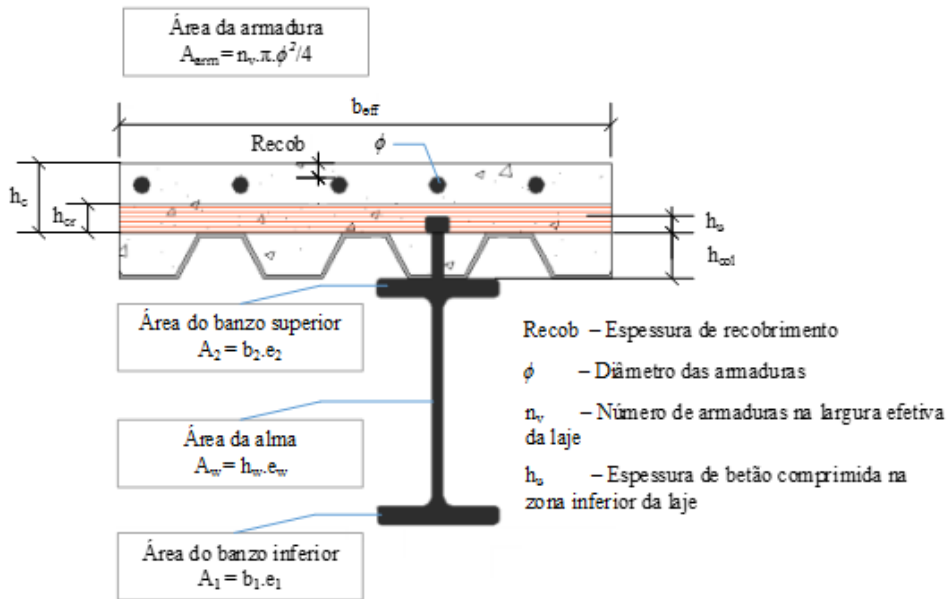


Figura 4.12 - Esquema genérico de uma viga mista com identificação dos parâmetros mais relevantes para o cálculo da resistência a momentos negativos por aplicação da teoria da plasticidade

No caso da flexão para momentos negativos existe naturalmente uma inversão da zona de trações e compressões. Mantendo o critério de desprezar a resistência à tração da laje de betão, considera-se que na zona superior apenas a armadura ordinária resistirá a este esforço, podendo eventualmente ter o contributo do perfil metálico, mediante o equilíbrio de esforços. A zona inferior do banzo de betão poderá participar na resistência da secção mista, mediante a relação entre a força máxima de tração na armadura e a força máxima de compressão no aço.

Os parâmetros necessários para determinação da posição do eixo neutro, no cálculo da resistência à flexão para momentos negativos são a força máxima de tração nas armaduras ($R_{arm,fi}$) e a força máxima de compressão no perfil ($R_{a,fi}$). As expressões para determinação destes parâmetros são:

$$R_{arm,fi} = f_{s,\theta} A_{arm} \quad (4.30)$$

$$R_{a,fi} = f_{y,\theta 1} A_1 + f_{y,\theta w} A_w + f_{y,\theta 2} A_2$$

onde,

$f_{s,\theta}$ - tensão de cedência do aço para armaduras em betão armado, à temperatura θ e atingida no instante t .

Nestas circunstâncias a força máxima de tração no aço do perfil é numericamente igual à sua força de compressão máxima. Salienta-se ainda que deve ser feita mais uma vez a determinação do grau de

conexão para cada instante analisado, sendo que desta feita o mesmo funciona como critério de verificação da segurança e não como condição de cálculo.

Em seguida apresentam-se as expressões de cálculo para determinação da capacidade resistente à flexão a momentos negativos em situação de incêndio, quando o eixo neutro encontra-se localizado na alma do perfil metálico.

O eixo neutro plástico está localizado na alma do perfil metálico quando a resistência máxima à tração da armadura é inferior à resistência máxima à compressão do perfil, sendo igualmente inferior à soma da resistência da alma e do banzo inferior. Nestas circunstâncias caso a distribuição de tensões toma a forma representada na Figura 4.13.

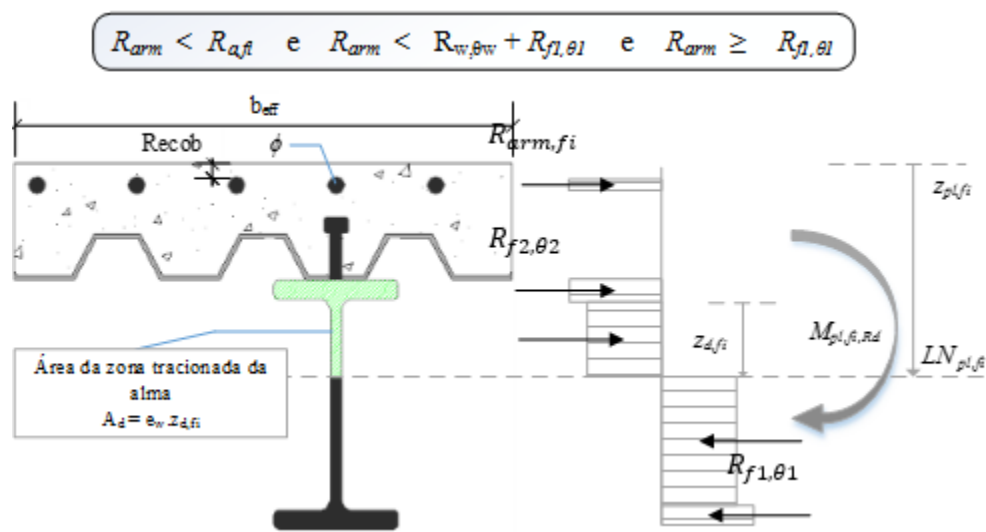


Figura 4.13 - Distribuição de tensões numa viga mista em situação de incêndio aplicando os princípios da teoria da plasticidade e segundo o método de cálculo simplificado, admitindo o eixo neutro localizado na alma do perfil

O equilíbrio interno de forças permite a determinação do posicionamento do eixo neutro plástico na alma do perfil:

$$\begin{aligned}
 \sum F = 0 &\Leftrightarrow R_{a,fi} - R_{f2,\theta2} - f_{y,\theta w} A_d = R_{arm,fi} + R_{f2,\theta2} + f_{y,\theta w} A_d \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow f_{y,\theta w} A_d = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{arm,fi}}{2} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow f_{y,\theta w} e_w z_{d,fi} = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{arm,fi}}{2} \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow z_{d,fi} = \frac{R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{arm,fi}}{2f_{y,\theta w} e_w} \frac{h_w}{h_w} \Leftrightarrow
 \end{aligned}
 \tag{4.41}$$

$$\Leftrightarrow z_{d,fi} = \frac{(R_{a,fi} - 2R_{f2,\theta2} - R_{arm,fi})h_w}{2R_{f_w,\theta_w}}$$

A capacidade resistente poderá ser determinada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} M_{Pl,fi,Rd} = & f_{y,\theta1}A_1 \left[\frac{e_1}{2} + (h_w - z_{d,fi}) \right] + \\ & + f_{y,\theta_w}e_w(h_w - z_{d,fi}) \left(\frac{h_w - z_{d,fi}}{2} \right) + \\ & + f_{y,\theta2}A_2(e_2 + z_{d,fi}) + \\ & + f_{y,\theta_w}e_w z_{d,fi} \left(\frac{z_{d,fi}}{2} \right) + \\ & + R_{arm,fi} \left(z_c - Recob - \frac{\emptyset}{2} + h_{cot} + e_a + z_{d,fi} \right) \end{aligned} \quad (4.42)$$

As restantes situações de localização do eixo neutro são detalhadas em Gavina (2013).

4.2.6 Resistência da secção à flexão com interação do esforço transversal

Para secções das classes 1 e 2 a influência do esforço transversal na resistência à flexão de vigas mistas em situação de incêndio deve ser tida em conta quando se verifica a seguinte condição:

$$V_{Ed,fi} > \min \left(\frac{V_{pl,fi,Rd}}{2}, \frac{V_{b,fi,Rd}}{2} \right) \quad (4.43)$$

onde,

$V_{Ed,fi}$ - esforço transversal atuante em situação de incêndio;

$V_{pl,fi,Rd}$ - esforço transversal resistente plástico ao nível da secção em situação de incêndio;

$V_{b,fi,Rd}$ - esforço transversal resistente à encurvadura em situação de incêndio.

Esta influência é tida em conta, pela redução da resistência do aço na zona de corte, tal como se indica na Figura 4.14.

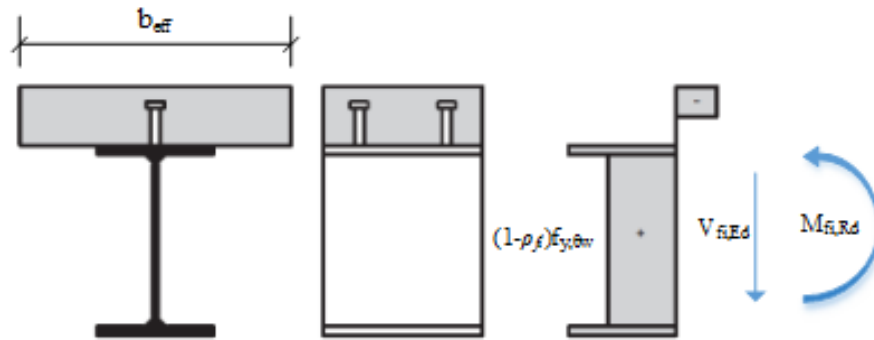


Figura 4.14 - Redução da tensão resistente do aço na alma na capacidade resistente da alma quando é considerada a interação entre o momento fletor e o esforço transversal (adaptado da EN 1994-1-1 (2009))

O fator de redução ρ_{fi} é calculado através da seguinte expressão:

$$\rho_{fi} = \left(\frac{2V_{fi,Ed}}{V_{fi,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (4.44)$$

onde,

$$V_{fi,Rd} = \min(V_{pl,fi,Rd}, V_{b,fi,Rd}) \quad (4.45)$$

4.2.7 Resistência à encurvadura por esforço transversal

Segundo a EN 1994-1-1 (2009) a resistência à encurvadura por esforço transversal de uma alma de aço não revestida por betão deve ser calculada pela EN 1993-1-5 (2006), sendo que a contribuição da laje apenas pode ser considerada com a utilização de métodos mais avançados.

A resistência à encurvadura ao esforço transversal depende em grande parte ao número de reforços aplicados à alma do perfil, bem como à sua disposição e localização. Estes reforços podem ser transversais ou longitudinais, tal como representado na Figura 4.15.

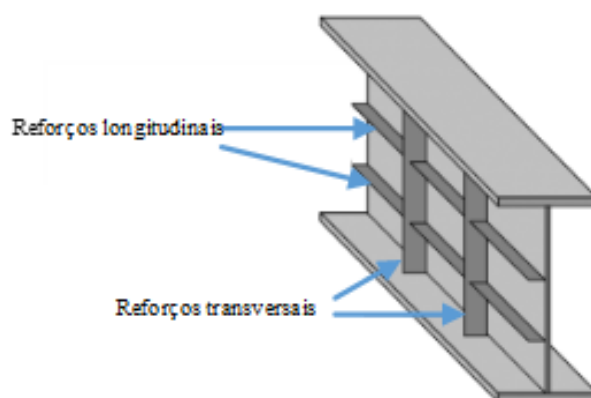


Figura 4.15 - Reforços na alma de perfil metálico para aumento da resistência à encurvadura por esforço transversal (Gavina (2013))

Será apenas abordado o cálculo relativo à situação mais frequente na utilização dos reforços. Assim sendo, limita-se a abordagem na presente secção aos casos em que são utilizados reforços transversais nos apoios.

O valor da resistência à encurvadura por esforço transversal envolve a contribuição de duas partes, a contribuição da alma e a contribuição dos banzos, tal como o indicado na expressão seguinte:

$$V_{b,fi,Rd} = V_{bw,fi,Rd} + V_{bf,fi,Rd} \leq \frac{\eta f_{y,\theta_w} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}} \quad (4.46)$$

onde,

$V_{bw,fi,Rd}$ - contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal em situação de incêndio para o instante t ;

$V_{bf,fi,Rd}$ - contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por esforço transversal em situação de incêndio para o instante t ;

η - coeficiente de valor recomendado igual a 1,2.

A contribuição da alma para a resistência à encurvadura por esforço transversal pode ser determinada por:

$$V_{bw,fi,Rd} = \frac{\chi_w f_{y,\theta_w} h_w e_w}{\sqrt{3} \gamma_{M,fi}} \quad (4.47)$$

O coeficiente relativo à contribuição da alma (χ_w) pode ser obtido através da Tabela 4.4, em função do tipo de reforço (rígido ou flexível).

Tabela 4.4 - Valores do coeficiente χ_w de acordo com a EN 1993-1-5 (2006)

Condição	Reforço rígido	Reforço flexível
$\bar{\lambda}_w < \frac{0,83}{\eta}$	$\chi_w = \eta$	$\chi_w = \eta$
$\frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w}$	$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w}$

Regra geral os reforços são rígidos, independentemente da temperatura. Note-se que embora estes reforços sejam afetados pela temperatura, diminuindo naturalmente a sua rigidez, serão sempre menos afetados do que o perfil metálico uma vez que são aplicados apenas nas zonas de apoio, que geralmente são zonas com menor exposição ao fogo.

Relativamente à esbelteza normalizada ($\bar{\lambda}_w$), e assumindo apenas reforços transversais na zona dos apoios, este parâmetro pode ser determinado pela expressão:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot e_w \cdot \varepsilon} \quad (4.48)$$

Note-se que o parâmetro ε é variável com a temperatura, devendo ser calculado pela expressão:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{y,\theta w}}} \sqrt{\frac{E_{\theta w}}{210000}} \quad (4.49)$$

Quanto à contribuição dos banzos para resistência à encurvadura por esforço transversal, apenas poderá ser levada em conta quando os mesmos não contribuem na sua totalidade para a resistência à flexão, isto é, quando $M_{fi,Ed} < M_{f,fi,Rd}$.

A resistência à flexão dos banzos do perfil metálico ($M_{f,fi,Rd}$), deve ser determinada assumindo uma secção fictícia para o perfil em que a alma não tem massa, tal como ilustra a Figura 4.16.



Figura 4.16 - Resistência à flexão de um perfil metálico considerando: a) a totalidade da secção; b) apenas os banzos

A contribuição dos banzos pode então ser determinada de acordo com a expressão:

$$V_{bf,fi,Rd} = \frac{b_f e_f^2 f_{y,\theta f}}{c \gamma_{M,fi}} \left[1 - \left(\frac{M_{fi,Ed}}{M_{f,fi,Rd}} \right)^2 \right] \quad (4.50)$$

onde,

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f e_f^2 f_{y,f\theta}}{e_w h_w^2 f_{y,w\theta}} \right) \quad (4.51)$$

onde,

a - distância entre reforços da alma, sendo no presente caso a distância entre apoios.

Note-se que os parâmetros b_f , e_f e $f_{y,f\theta}$ correspondem ao banzo com menor contribuição para a resistência ao esforço normal. Como tal, em cada instante deve ser avaliada a força resistente no banzo superior e inferior, com base nas temperaturas atingidas em cada um, e identificam aquele que tem menor contributo para a resistência.

Deve ainda ser atendido, tal como indica a EN 1993-1-5 (2006), que a largura b_f não pode ser superior a $15\epsilon e_f$ em cada lado da alma. O valor de $M_{f,fi,Rd}$ poderá ainda ser reduzido na presença de esforço axial.

5 FERRAMENTAS DE CÁLCULO COM INTEGRAÇÃO BIM

5.1 CONCEITO DE MODELOS DE INFORMAÇÃO DOS EDIFÍCIOS (BIM)

O *Building Information Modeling*, vulgo BIM, é uma metodologia de partilha da informação e de comunicação entre todos os intervenientes e durante todas as fases do ciclo de vida de uma construção que se apoia num modelo digital, acessível por programas específicos, o qual permite a manipulação virtual dessa mesma construção. Trata-se, de forma simplista, de uma simulação digital em três dimensões de um edifício real e todos os seus componentes.

A modelação BIM implica um maior gasto de tempo e recursos na fase de planeamento e projeto, tempo que deverá ser amplamente recuperado a médio e longo prazo, revelando-se muito útil ao longo da vida útil do empreendimento. Este modelo procura uma abordagem que contrarie o facto de a indústria da construção ser a única indústria que viu a sua produtividade diminuída desde a computação. De seguida, na Figura 5.1 apresentam-se as principais vantagens da metodologia BIM.



Figura 5.1 - Vantagens da metodologia BIM

Os principais objetivos de um projeto integrado é eliminar as tarefas desconexas e trabalhos repetidos, reduzir problemas com o fluxo de trabalho, e promover a previsibilidade, fornecendo ao cliente maior segurança sobre o resultado do projeto. Para isso é necessário possuir outputs que contenham a

informação necessária para a realização de todas as tarefas de modo eficiente. Apresentam-se na Figura 5.2 as formas que podem tomar a informação com origem no modelo BIM.

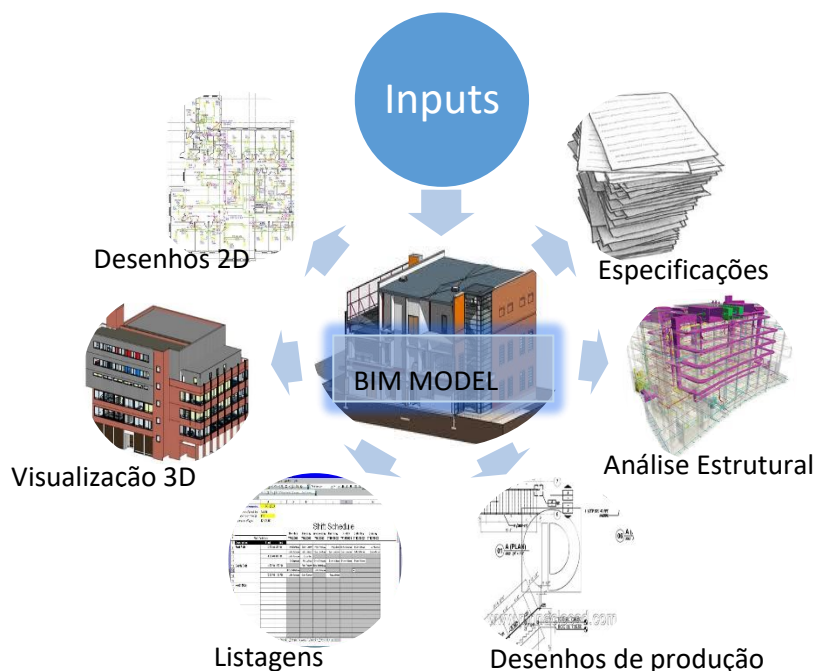


Figura 5.2 - Representação dos Outputs de um modelo BIM

Entre os diversos programas de modelação paramétrica, existem alguns considerados 5D, porque além da modelação 3D, permitem igualmente imputar dados à obra em tempo real, bem como a medição de todo o projeto e respetiva orçamentação. Para além disso permitem também a conversão do modelo no formato IFC, que exporta todo o modelo e respetivos dados anexos, em formato txt.

O formato IFC é uma especificação neutra e aberta que não é controlado por um único fornecedor ou grupo de fornecedores. É um formato de arquivo com um modelo de dados desenvolvido para facilitar a interoperabilidade entre a indústria de arquitetura, engenharia e construção, frequentemente usado para a modelação de informações de construção (BIM). A metodologia BIM não é aplicável apenas à engenharia, revelando-se muito útil na arquitetura que poderá ser muito útil, considerando que esta atividade é precursora de muitos trabalhos de engenharia.

Este conceito ainda precisa ser difundido e aperfeiçoado por parte das empresas desenvolvem e comercializam *software* usado pelos projetistas, uma vez que em projetos de grande complexidade verificam-se problemas de compatibilidade entre programas. Apesar disso, é um conceito que tem ainda muita margem de progressão e pode vir a tornar-se indispensável para a indústria da construção civil.

No presente trabalho apresentam-se as ferramentas de cálculo criadas e a sua relação com os programas de carácter BIM utilizados na empresa.

5.2 OBJETIVOS DAS FERRAMENTAS DE CÁLCULO

Foram desenvolvidas duas ferramentas de cálculo com o objetivo de realizar a análise ao fogo de estruturas metálicas e mistas, visando a determinação da necessidade da sua proteção passiva. Estas ferramentas foram desenvolvidas em *Visual Basic* no Excel (VBA), e fazem parte de uma série de procedimentos que se desenrolam entre o Excel, o Revit, e o Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA).

As duas ferramentas, tendo objetivos comuns, são bastante distintas, quer no seu layout, como na relação que possuem com os outros programas, potencialidades e limitações. A primeira ferramenta criada incidiu sobre os elementos metálicos, e a segunda focou-se nos elementos mistos. Como seria de esperar a primeira é de mais fácil compreensão e manuseio, sendo a segunda, devido ao maior número de variáveis existentes, mais complexa, como se depreenderá pela descrição de cada uma em secção posterior.

Todas as metodologias de análise ao fogo foram realizadas segundo os Eurocódigos e de acordo com as metodologias de trabalho aplicadas pela empresa SE2P. Mais uma vez salienta-se que as ferramentas são para uso prático da empresa, obrigando à necessidade de cumprir os objetivos segundo uma coerência de trabalho já instalada e reconhecida pelos demais funcionários. À necessidade de garantir a segurança estrutural inscrita nos Eurocódigos adicionou-se portanto um carácter prático e económico às ferramentas para o seu manuseamento fácil e útil.

De modo resumido os objetivos a atingir com as ferramentas de cálculo desenvolvidas foram os seguintes:

- Segurança Estrutural;
- Economia;
- Fluidez, autonomia e facilidade de utilização;
- Integração com os restantes programas utilizados.

5.3 PROGRAMAS INFORMÁTICOS UTILIZADOS

Os programas utilizados foram o *Revit*, o *ARSA* e o *Excel*. Estes programas deverão ter uma boa articulação entre si de modo a proporcionarem bons resultados no menor espaço de tempo possível.

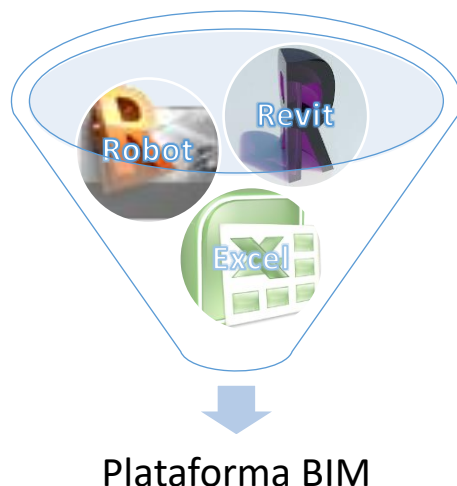


Figura 5.3 - Conceito BIM resulta da interoperabilidade de *software*

A boa interoperabilidade das ferramentas irá redundar numa plataforma que poderá ser considerada BIM. De salientar que aliadas às qualidades que só por si possuem estas ferramentas são usadas atualmente na empresa também pelo facto de possuírem características BIM.

5.3.1 Programa *EXCEL*

O *Excel* é um programa de folha de cálculo amplamente usado por empresas e particulares para a realização de operações financeiras e contabilísticas, cálculos diversos, incluindo no âmbito da engenharia. As folhas de cálculo são constituídas por células organizadas em linhas e colunas constituindo um programa dinâmico, com interface atrativa e muitos recursos para o utilizador.

Este programa é usado para realizar uma infinidade de tarefas como: cálculos simples e complexos, criação de lista de dados, elaboração de relatórios e gráficos sofisticados, projeções e análise de tendências, análises estatísticas e financeiras. Possui uma linguagem de programação, o *Visual Basic for Application*, vulgo VBA, que foi usada para a criação das ferramentas de cálculo, permitindo assim uma automatização que resulta numa poupança de tempo no cálculo das espessuras de proteção passiva. Na Figura 5.4 é apresentado o interface gráfico do VBA no *Excel*.

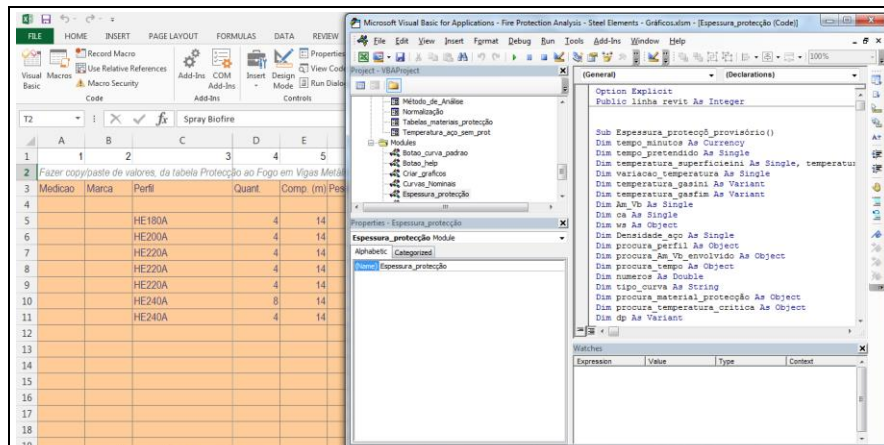


Figura 5.4 - Interface gráfico do VBA

5.3.2 Programa REVIT

O *Revit*  um programa criado de acordo com o conceito BIM, que utiliza a modelao paramétrica de elementos (designados por famílias). Este *software* permite uma completa associatividade bidirecional, pelo que uma alterao realizada num ponto do projeto reflete-se em todas as vistas do mesmo. Um projeto pode ser executado ao mesmo tempo por vários utilizadores, sendo criado um arquivo central que armazena a cópia original do projeto, e cada utilizador trabalha numa cópia do arquivo central, armazenada na estao de trabalho do utilizador. Quando for necessário o utilizador pode fazer sincronizao com o arquivo central e assim salvar o trabalho num destino comum a todos. O *Revit* verifica se os utilizadores editam o mesmo objeto em simultâneo, e caso tal aconteça reporta uma mensagem de aviso, evitando conflitos e trabalhos duplicados.

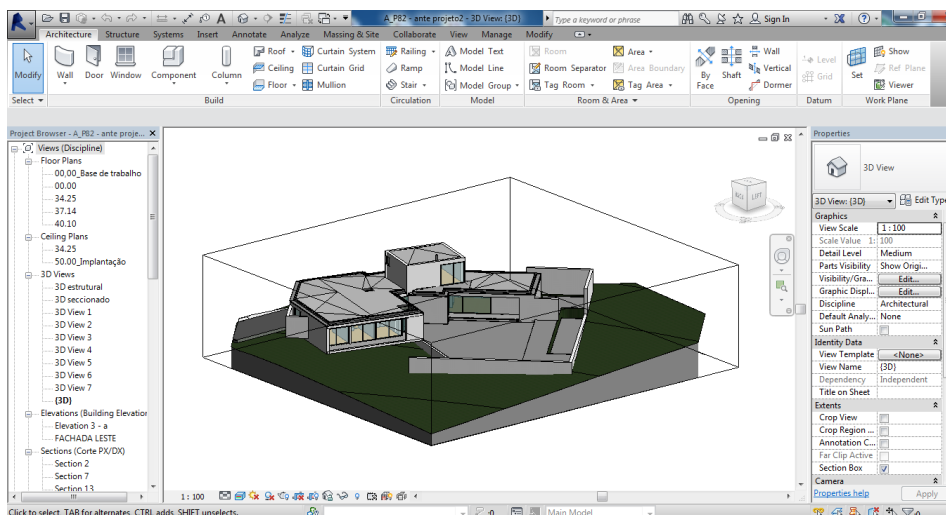


Figura 5.5 - Interface gráfica do REVIT

A utilização das famílias de elementos permite um interface gráfico muito atraente (Figura 5.5) e grande detalhe na descrição dos mesmos, possibilitando associar a cada elemento diversas características que depois podem ser agregadas em tabelas (*schedules*), muito úteis para calcular quantidades e custos. Para definir o edifício são utilizados objetos 3D, como paredes, pavimentos, coberturas, elementos de estrutura, janelas, portas, e muitos outros.

O *Revit* é o programa central na plataforma BIM idealizada, sendo o repositório de toda a informação sobre o edifício e seus constituintes fornecendo *inputs* ao *Robot* e ao *Excel* e recebendo os seus *outputs*. Os perfis metálicos já têm associado na base de dados características como as massividades, área de pintura, etc. Assim o preenchimento dos *schedules* é automatizado.

Os aspetos mais importantes deste programa serão detalhados aquando da descrição das ferramentas de cálculo.

5.3.3 Programa Autodesk *Robot Structural Analysis*

O *Autodesk Robot Structural Analysis* (ARSA) é uma poderosa ferramenta de cálculo estrutural que utiliza o método de elementos finitos, adotada por diversos gabinetes e universidades de engenharia, tanto na realização de projetos de grande dimensão a nível nacional e internacional, como também no estudo e elaboração de projetos de investigação. Proporciona aos engenheiros estruturais capacidades avançadas de simulação e análise de construção para estruturas grandes e complexas.

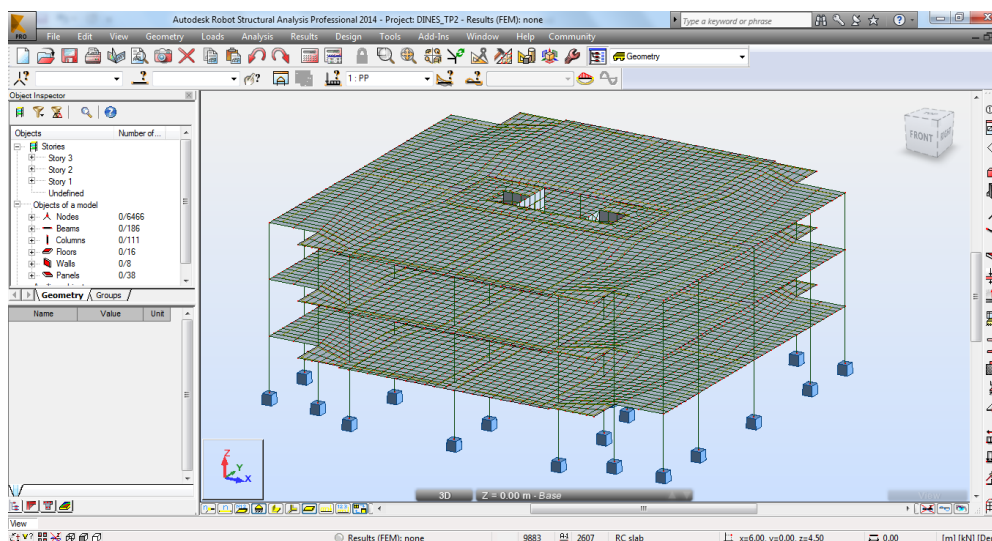


Figura 5.6 – Interface gráfica do ARSA

O ARSA é particularmente eficaz na verificação da segurança e no dimensionamento de estruturas de aço devido à solução pragmática implementada no *software* (“verifica” ou “não verifica”), disponibilizando o

rácio de utilização de cada perfil, muito útil para otimização e controlo por parte do projetista. É também bastante atrativo a sua interface e intuitiva a sua utilização, como se pode constatar pela Figura 5.6.

Como referido anteriormente possui uma ligação bidirecional com o *Revit*, permitindo com isso poupança de tempo, uma vez que é evitada a modelação duplicada da estrutura, e a necessidade de atualização separada dos dois modelos por cada alteração que seja necessária realizar.

O ARSA foi usado para determinar as secções dos perfis constituintes da estrutura metálica, assim como as suas temperaturas críticas.

6 DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO AUTOMÁTICO DE PROJETO DE ESTRUTURAS METÁLICAS

6.1 INTRODUÇÃO

Mais do que um programa, foi idealizado um processo onde os programas se complementam e interagem para verificar a necessidade de aplicação de proteção passiva dos perfis metálicos, e caso seja, determinar a quantidade de proteção. Para esse efeito é aplicado o método de cálculo simplificado da EN 1993-1-2 (2009), com a possibilidade de se considerar uma das três curvas nominais que se encontram descritas na EN 1991-1-2 (2009). O programa criado é apenas um elemento, preponderante é certo, desta cadeia de valores, sendo que o carácter prático e simples deste processo torná-lo muito importante para o projeto de estruturas metálicas no âmbito da empresa, e proporcionará maior capacidade de competitividade nos projetos futuros.

A Figura 6.1 resume a sequência de procedimentos que é utilizada, por se entender ser a forma mais simples, prática e completa de realizar um projeto tendo em vista a obtenção de proteções contra incêndio, assim como as demais quantidades de produtos envolvidos na construção.



Figura 6.1 - Sequência de procedimentos na elaboração de um projeto

Estes procedimentos já são em parte adotados pela empresa, estando por isso os colaboradores familiarizados com estas fases de projeto, não causando por isso qualquer transtorno inicial de alteração de hábitos decorrentes da sua utilização.

Neste capítulo serão descritos todos os procedimentos que foram efetuados nos diversos programas para obter o máximo de cooperação entre os mesmos. Para além do trabalho que se apresenta foram

obviamente estudadas muitas outras situações e pormenores, sendo a que se apresenta a que se julga a mais eficaz.

Este programa realiza dois tipos de análise para determinar a espessura mínima de proteção para elementos metálicos:

- cálculo analítico;
- consulta de tabelas.

O cálculo analítico é efetuado quando são conhecidas determinadas propriedades do material de proteção, nomeadamente a sua condutividade térmica, calor específico, massa específica e a percentagem de humidade na sua constituição. O cálculo é incremental em temperatura, para intervalos de tempo de 3 segundos, até ao tempo de exposição pretendido (*FireRating*), sendo a segurança verificada quando a temperatura do perfil é inferior à sua temperatura crítica.

As tabelas consultadas possuem a informação da temperatura crítica do perfil, da sua massividade e da sua exposição ao fogo (três ou quatro lados). Estas foram validadas por ensaios laboratoriais e fazem parte dos manuais técnicos do vendedor. Esta análise possui uma vertente mais comercial, uma vez que se tratam de produtos devidamente certificados disponíveis no mercado.

6.2 PERSONALIZAÇÃO DO PROGRAMA REVIT

O *Revit* assume papel determinante em todo o processo, sendo o repositório de toda a informação relativa a cada perfil que compõe a estrutura. No programa é realizada a modelação do edifício e da respetiva estrutura que o suporta.

Para cada objeto (pilar, viga, etc.) é possível definir as suas propriedades através de parâmetros de instância que podem ser editados. A Figura 6.2 mostra a tabela que é apresentada quando se seleciona, por exemplo, um pilar. As linhas preenchidas a cinza (*Text, Structural, etc.*) são designadas grupos de parâmetros, correspondendo a cada um uma série de dados de trabalho (fase de obra, localização, etc.).

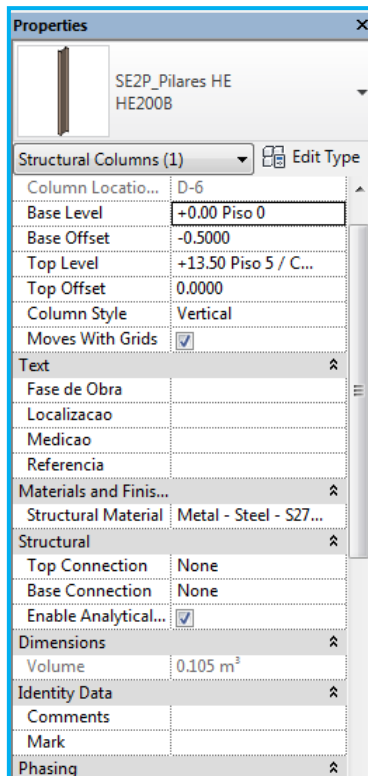


Figura 6.2 - Tabela *Properties* apresentada no Revit para um pilar

Para a situação de fogo foi necessário criar um grupo de parâmetros designado por *Fire Protection*, que contém informação que caracteriza o perfil no que diz respeito à situação de incêndio, cuja vista detalhada pode ser vista na Figura 6.3.

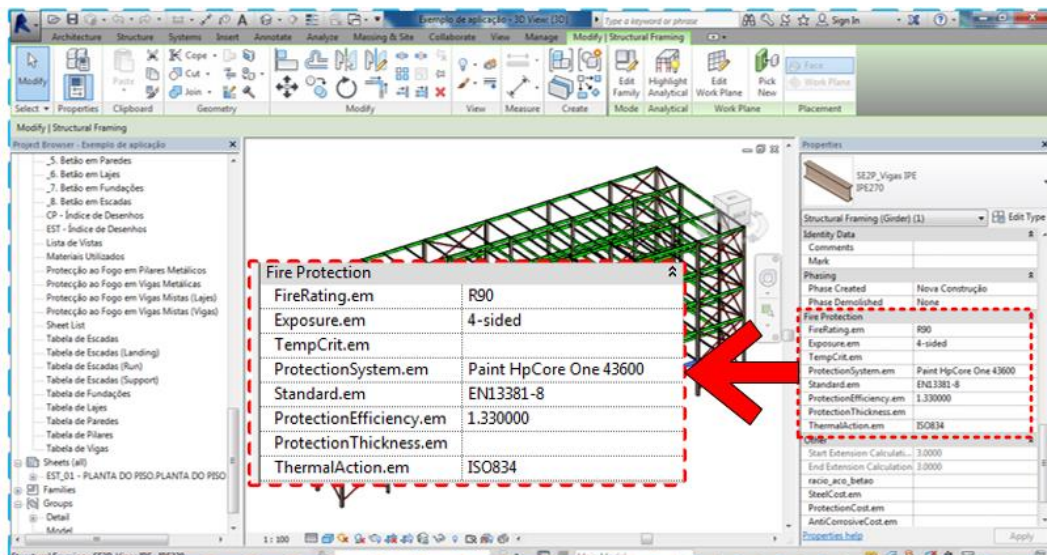


Figura 6.3 - Pormenor do grupo de parâmetros *Fire Protection*

Os parâmetros de instância contidos no grupo são os seguintes:

- *FireRating* – Período de tempo mínimo que a estrutura deverá manter a sua integridade estrutural (R30,R60, etc.);
- *Exposure* – Indica a exposição do elemento ao fogo (quatro lados (*4-sided*) ou três lados (*3-sided*));
- *TempCrit* – A temperatura máxima que o perfil pode atingir mantendo a segurança estrutural, obtida pelo ARSA;
- *ProtectionSystem* – Tipo de proteção utilizada para o revestimento do perfil (deve ser consultada a folha *Propriedades_Material_Proteção*, onde estão listados todos os tipos de proteção que podem ser utilizados;
- *Standard* – Norma pela qual o material foi ensaiado e normalizado (BS476, EN13381-4 (2002), EN13381-8 (2002));
- *ProtectionEfficiency* – Se a proteção escolhida for tinta intumescente, o consumo de tinta por metro linear é obtido multiplicando a área de pintura por metro linear, a espessura e a eficiência da tinta. O volume ocupado pela tinta depois de seca é menor do que aquando da aplicação, pelo que o consumo real é superior ao consumo teórico. Este fator assume sempre um valor superior à unidade.
- *ProtectionThickness* – Espessura mínima de proteção necessária;
- *ThermalAction* – definir tipo de curva de incêndio nominal a utilizar, curva padrão (ISO834), curva exterior (*External Curve*), ou curva de hidrocarbonetos (*Hydrocarbon Curve*).

Estes parâmetros são introduzidos manualmente e em consonância com a ferramenta de cálculo *FirePro-Steel*, de modo a promover a compatibilidade entre os dois. A “eficiência da proteção” e a “espessura de proteção”, não são preenchidos porque não se pretende que sejam exportados para o *FirePro-Steel*.

Para além dos parâmetros de instância, existem também os parâmetros de tipo, de que são exemplo a massividade do perfil e a exposição, igualmente importantes para a descrição do perfil. Os dois tipos de parâmetros contêm dados que são usados para preencher tabelas, designadas pelo *Revit* como *schedules*.

Os *schedules* foram designados “Proteção ao fogo em Pilares Metálicos” e “Proteção ao fogo em Vigas Metálicas”, como pormenorizado na Figura 6.4.

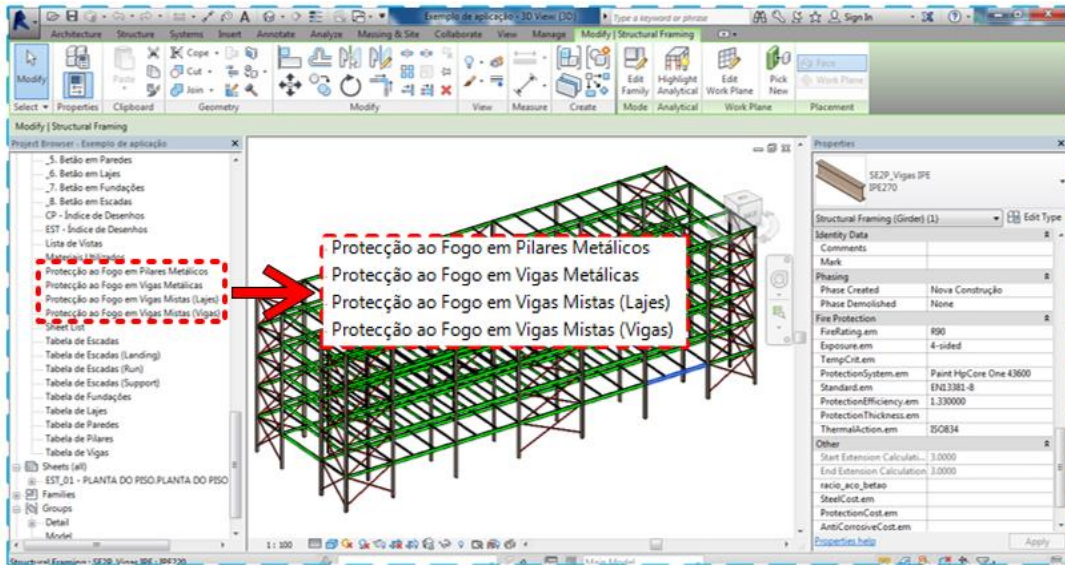


Figura 6.4 - Schedules relativos aos pilares e vigas a proteger à ação do fogo

Ao seleccionar um *schedule* surge uma tabela como a apresentada na Figura 6.5, onde automaticamente são preenchidos os dados relativos aos elementos que constituem a obra. Os dados que surgem no *schedule* foram personalizados com as características mais importantes e segundo a ordem mais lógica.

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Perfil	Qua	Com	Peso	Peso (kg)	AL em	Área Pintu	Am'	AmV'	AmV	Am	Standar	FireRatin	Thermal	TempCr	Exposu	ProtectionSystem em
CHS114.3x6.3	4	4.42	16.80	297.09	0.359 m²	6.35 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	750	4-si	Paint HpCore One 4
CHS114.3x6.3	4	5.24	16.80	352.67	0.359 m²	7.54 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	800	4-si	Paint HpCore One 4
CHS114.3x6.3	4	4.42	16.80	297.49	0.359 m²	6.36 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	950	4-si	Paint HpCore One 4
CHS114.3x6.3	4	5.26	16.80	354.08	0.359 m²	7.57 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	950	4-si	Paint HpCore One 4
CHS114.3x6.3	4	5.24	16.80	352.67	0.359 m²	7.54 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	1000	4-si	Paint HpCore One 4
CHS114.3x6.3	4	4.42	16.80	297.49	0.359 m²	6.36 m²	168	168	214	214	EN1	R90	ISO8	1050	4-si	Paint HpCore One 4

ZONA A

T	U	V	W	X	Y
ProtectionThickness em	ProtectionEfficiency em (lt/m)	Consumo de Tinta Intumescente (lt)	SteelCost	ProductionC	AntiCorrosive
	1.33	0.00			
	1.33	0.00			
	1.33	0.00			
	1.33	0.00			
	1.33	0.00			
	1.33	0.00			

ZONA B

W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
SteelCost em	ProductionC	AntiCorrosiveC	ProtectionCost em	Steel Cost (€)	Production Cost (€)	AntiCorrosive Cost (€)	Protection Cost (€)	HasStuds em
				0.00€	0.00€	0.00€	0.00€	
				0.00€	0.00€	0.00€	0.00€	
				0.00€	0.00€	0.00€	0.00€	
				0.00€	0.00€	0.00€	0.00€	
				0.00€	0.00€	0.00€	0.00€	

ZONA C

Figura 6.5 - Schedule "Protecção ao fogo em pilares metálicos"

Na zona A encontram-se os dados que são exportados para o *FirePro-Steel*, tendo a mesma disposição de colunas de modo a compatibilizar o conteúdo. Na zona B encontra-se a espessura de proteção, dado que resulta da análise no *FirePro-Steel*, e outros dados relevantes para a análise económica e na Zona C encontra-se a informação da análise económica.

6.3 APRESENTAÇÃO DO FIRE PROTECTION ANALYSIS – STEEL ELEMENTS

Os programas existentes no mercado que realizam a análise da resposta ao fogo de perfis metálicos, fazem-no perfil a perfil, tornando muito morosa a análise de toda uma estrutura que pode conter dezenas ou centenas de perfis com diferentes situações de exposição. Esta morosidade não é compatível com o trabalho desenvolvido num gabinete de projeto, onde cada vez mais são exigidos prazos mais curtos para obtenção de soluções e maior rigor nas mesmas. Para além disso, e igualmente importante, tem-se o facto de que estes programas realizam os cálculos de proteções com materiais fictícios, ou seja, admitindo propriedades que na realidade poderão ser mais ou menos semelhantes às dos materiais que existem no mercado. É por isso pertinente que o programa tenha a capacidade de realizar o cálculo com materiais fictícios, mas que também consiga obter proteções com materiais existentes no mercado, devidamente normalizados e tabelados, uma vez que estes têm custos definidos, possibilitando a realização duma análise económica mais realista para cada tipo de proteção.

Com esta premissa, foi produzido o programa *Fire Protection Analysis – Steel Elements (FirePro-Steel)*, um *software* capaz de efetuar a análise de inúmeros perfis em simultâneo usando sistemas de proteção fictícios ou existentes no mercado. A ferramenta complementa o programa *Revit*, de modo simples e prático, tornando o cálculo de proteções bastante rápido.

Quando se inicia o *FirePro-Steel* possível aceder ao assistente ou continuar com a execução do programa, como se pode verificar na Figura 6.6.

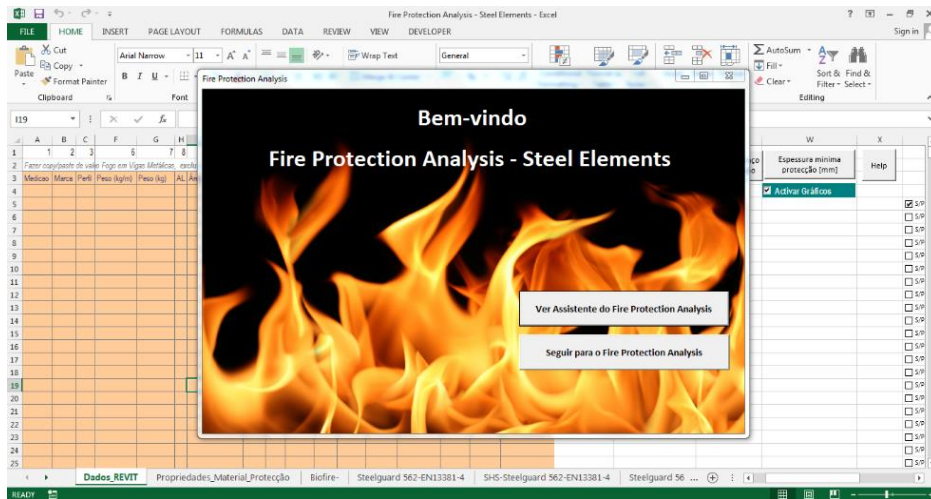


Figura 6.6 – Início do programa *FirePro-Steel*

Através do assistente podem ser consultadas as instruções de preenchimento, normas utilizadas, soluções para erros ocorridos, etc. Este assistente foi idealizado sob um ponto de vista prático na ótica do utilizador de forma a ser consultado em caso de dificuldades no uso da folha de cálculo (ver Figura 6.7). Em qualquer momento este tutorial pode ser acedido através de um botão *HELP* na interface da folha de cálculo.

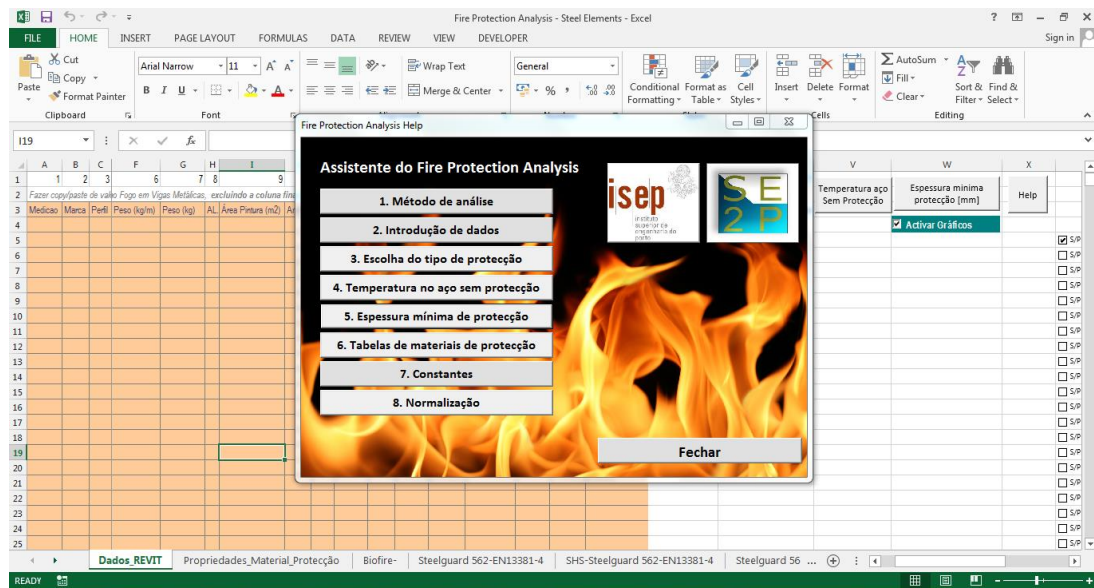


Figura 6.7 - Assistente do *FirePro-Steel*

A folha de *Excel* contém diversos separadores, sendo de seguida explicado que informação contém cada um deles. O separador *Dados_REVIT* apresenta três zonas distintas, como se verifica na Figura 6.8.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		Protection technique	Calculation Method	Massa especifica	Moisture content P [%]	Condutibilidade térmica	Specific heat Cp
3				ρ [Kg/m ³]		λ_p [W/(mK)]	[J/(KgK)]
4		-					
5	STD Spray mineral fibre	profile	Analytical	300	1	0.12	1200
6	STD Spray vermiculite cement	profile	Analytical	350	15	0.12	1200
7	STD Spray perlite	profile	Analytical	350	15	0.12	1200
8	STD Spray HD vermiculite and cement	profile	Analytical	550	15	0.12	1100
9	STD Spray HD perlite and cement	profile	Analytical	550	15	0.12	1100
10	Spray Biofire	profile	Table				
11	STD Spray HD vermiculite and gypsum	profile	Analytical	650	15	0.12	1100
12	STD Spray HD perlite and gypsum	profile	Analytical	650	15	0.12	1100
13	STD Board vermiculite and cement	box	Analytical	800	15	0.2	1200
14	STD Board perlite and cement	box	Analytical	800	0	0.2	1200
15	STD Board fibre-silicate	box	Analytical	600	3	0.15	1200
16	STD Board fibre-calcium-silicate	box	Analytical	600	0	0.15	1200
17	STD Board fibre-cement	box	Analytical	800	5	0.15	1200
18	STD Board gypsum	box	Analytical	800	20	0.2	1700
19	STD Compressed fiber boards fibre silicate	box	Analytical	150	2	0.2	1200
20	Concrete	solid	Analytical	2300	4	1.6	1000
21	Light weight concrete	solid	Analytical	1600	5	0.8	840
22	STD Concrete bricks	box	Analytical	2200	8	1	1200
23	STD Brick with holes	box	Analytical	1000	0	0.4	1200
24	STD Solid bricks	box	Analytical	2000	0	1.2	1200
25	Paint 7B-300	profile	Table				
26	Paint 7H-960	profile	Table				
27	Paint Firetex FX1003	profile	Table				
28	Paint Steelguard 562	profile	Table				
29	Paint HpCore One 43600	profile	Table				

Dados_REVIT
Propriedades_Material_Protecção
Biofire-
Steelguard 562-EN13381-4
SH

Figura 6.11 - Separador Propriedades_Material_Protecção

Todos os materiais novos adicionados à lista têm que ser precedidos de identificação do tipo *Paint*, *Board*, *Spray* ou outro, desde que tenha cinco caracteres seguido de um espaço, como nos elementos já listados.

No separador *Dados_REVIT*, os nomes na coluna *ProtectionSystem* terão que ser iguais aos desta lista, de modo a que o tipo de proteção seja devidamente reconhecido (Ex: *Paint Steelguard 562*, *STD Board perlite and cement*).

Os restantes separadores são de proteções existentes no mercado onde o programa efetua a pesquisa da espessura de proteção. Podem ser adicionados separadores com novos materiais, desde que a sua apresentação seja idêntica aos existentes e o seu nome seja acrescentado na folha *Propriedades_Material_Protecção*.

Figura 6.12 - Separador *Steelguard 562-EN13381-4*

A pesquisa realizada é função do tempo mínimo de proteção, do número de lados do perfil expostos ao fogo, da massividade do perfil e da temperatura crítica.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	R15/3-sided										
3	Massividade/Temperatura	350	400	450	500	550	600	620	650	700	
4	60	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
5	65	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
6	70	0.220	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
7	75	0.240	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
8	80	0.250	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
9	85	0.270	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
10	90	0.280	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
11	95	0.300	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
12	100	0.310	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
13	105	0.330	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
14	110	0.340	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
15	115	0.360	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	
16	120	0.380	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	

Figura 6.13 - Pormenor do separador *Steelguard 562-EN13381-4*

Preenchidos os campos necessários, o cálculo é iniciado com a determinação da temperatura do aço sem protecção, conforme ilustra a Figura 6.14.

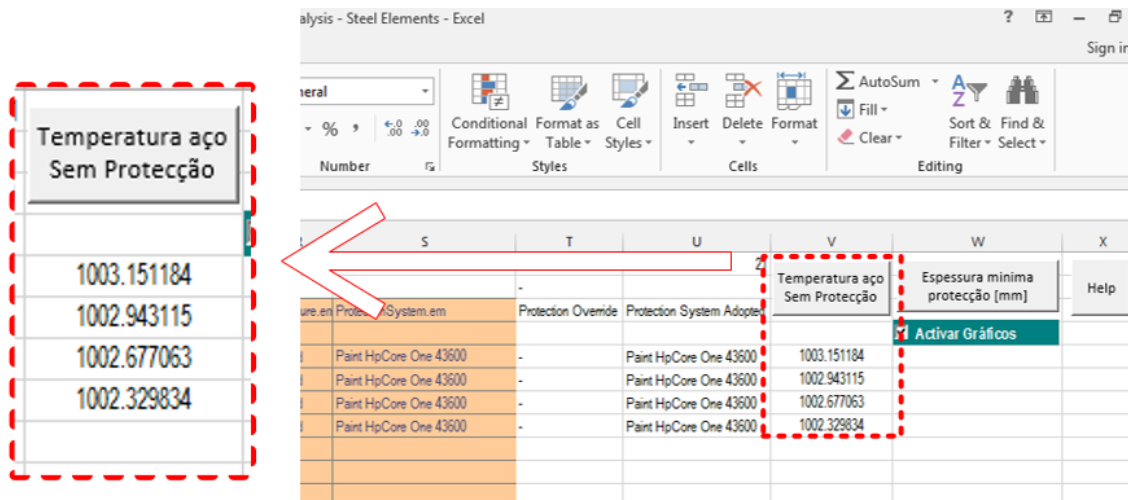


Figura 6.14 - Determinação da temperatura do aço sem protecção

Caso a temperatura obtida seja superior à temperatura crítica torna-se necessário realizar a protecção do perfil. De seguida determina-se a espessura mínima de protecção, em milímetros, como se pode observar na Figura 6.15.

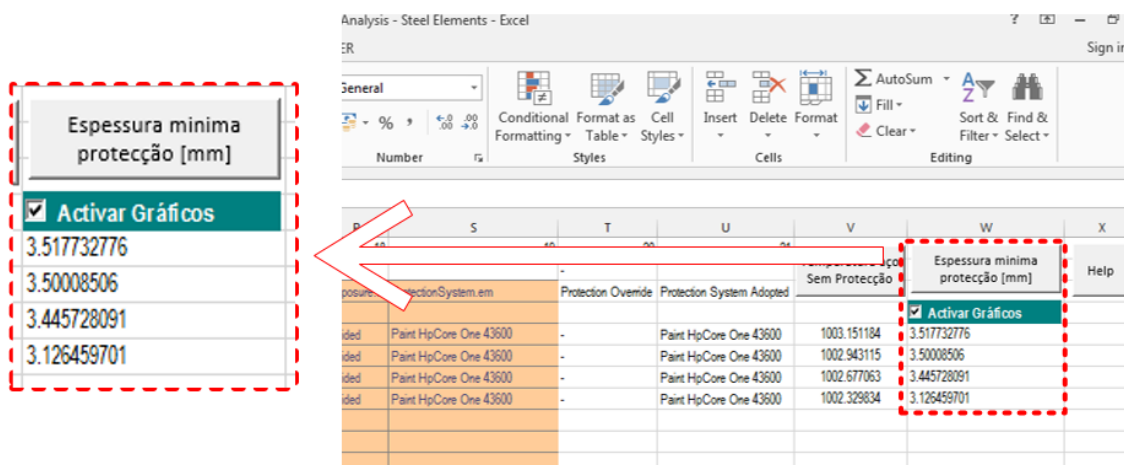


Figura 6.15 - Determinação da espessura mínima de protecção

O programa tem a opção de gerar gráficos com a representação da evolução da temperatura da curva utilizada e da temperatura do aço (ver Figura 6.16). O gráfico pode conter o desenvolvimento da temperatura para vários perfis em simultâneo bastando para tal seleccionar os perfis desejados.

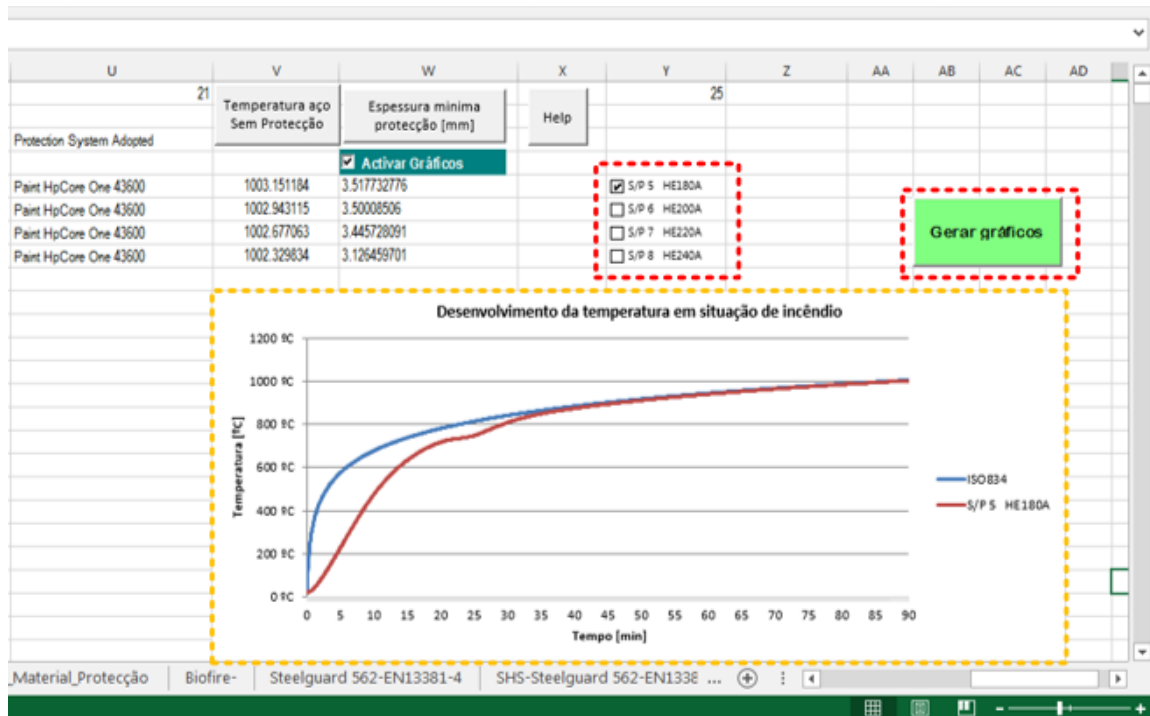


Figura 6.16 - Opção de gerar gráficos

A visualização do gráfico permite de modo simples ter noção do diferencial de temperatura que se instala no perfil com e sem protecção face ao ambiente envolvente.

6.4 VALIDAÇÃO DO FIRE PROTECTION ANALYSIS – STEEL ELEMENTS

Para a validação do cálculo analítico realizado pelo *FirePro-Steel* foi realizada a comparação com o programa Elefir. O Elefir é um programa para a avaliação da resistência ao fogo de elementos de aço carbono e inoxidável de acordo com a norma EN 1991 e 1993, elaborado por Paulo Vila Real e Jean-Marc Franssen. Trata-se de um programa de referência na área da análise ao fogo em estruturas metálicas, pelo que a sua utilização para a validação do *FirePro-Steel* justifica-se plenamente.

Para a validação foi utilizado o perfil HEB 140, com diversos sistemas de protecção, curvas de incêndio, técnicas de protecção, exposição, temperaturas críticas, e tempo de resistência. Não foi utilizada a curva de incêndio exterior uma vez que o Elefir não a possui.

Na Tabela 6.1, Tabela 6.2, Tabela 6.3 e Tabela 6.4 apresentam-se comparações em que foi utilizada a curva ISO 834.

Tabela 6.1 – Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 3 lados a fogo simulado pela curva ISO 834

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		Dif.
			Fire Protection Analysis	Elefir	
R30	400	Spray mineral fibre	10	10	0.0%
R30	500	Spray mineral fibre	7	7	0.0%
R30	600	Spray mineral fibre	5	5	0.0%
R30	700	Spray mineral fibre	3	3	0.0%
R30	800	Spray mineral fibre	Sem proteção	Sem proteção	0.0%
R60	400	Spray mineral fibre	23	22	4.3%
R60	500	Spray mineral fibre	16	16	0.0%
R60	600	Spray mineral fibre	11	11	0.0%
R60	700	Spray mineral fibre	8	8	0.0%
R60	800	Spray mineral fibre	4	4	0.0%
R90	400	Spray mineral fibre	36	34	5.6%
R90	500	Spray mineral fibre	26	25	3.8%
R90	600	Spray mineral fibre	19	18	5.3%
R90	700	Spray mineral fibre	13	13	0.0%
R90	800	Spray mineral fibre	8	8	0.0%

Tabela 6.2 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 4 lados a fogo simulado pela curva ISO 834

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		Dif.
			Fire Protection Analysis	Elefir	
R30	400	Spray perlite	12	11	8.3%
R30	500	Spray perlite	8	8	0.0%
R30	600	Spray perlite	6	6	0.0%
R30	700	Spray perlite	3	4	25.0%
R30	800	Spray perlite	Sem proteção	Sem proteção	0.0%
R60	400	Spray perlite	24	24	0.0%
R60	500	Spray perlite	18	18	0.0%
R60	600	Spray perlite	13	13	0.0%
R60	700	Spray perlite	9	9	0.0%
R60	800	Spray perlite	5	5	0.0%
R90	400	Spray perlite	36	34	5.6%
R90	500	Spray perlite	28	27	3.6%
R90	600	Spray perlite	21	21	0.0%
R90	700	Spray perlite	15	15	0.0%
R90	800	Spray perlite	9	9	0.0%

Tabela 6.3 - Comparação realizada com proteção em caixão e perfil exposto em 3 lados a fogo simulado pela curva ISO 834

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		
			Fire Protection Analysis	Elefir	Dif.
R60	400	Board vermiculite and cement	21	20	4.8%
R60	500	Board vermiculite and cement	16	15	6.3%
R60	600	Board vermiculite and cement	12	11	8.3%
R60	700	Board vermiculite and cement	8	8	0.0%
R60	800	Board vermiculite and cement	4	4	0.0%
R90	400	Board vermiculite and cement	31	30	3.2%
R90	500	Board vermiculite and cement	24	23	4.2%
R90	600	Board vermiculite and cement	18	18	0.0%
R90	700	Board vermiculite and cement	13	13	0.0%
R90	800	Board vermiculite and cement	8	8	0.0%
R120	400	Board vermiculite and cement	41	38	7.3%
R120	500	Board vermiculite and cement	32	31	3.1%
R120	600	Board vermiculite and cement	25	24	4.0%
R120	700	Board vermiculite and cement	19	18	5.3%
R120	800	Board vermiculite and cement	12	11	8.3%

Tabela 6.4 - Comparação realizada com proteção em caixão e perfil exposto em 4 lados a fogo simulado pela curva ISO 834

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		
			Fire Protection Analysis	Elefir	Dif.
R60	400	Board gypsum	23	22	4.3%
R60	500	Board gypsum	18	17	5.6%
R60	600	Board gypsum	14	13	7.1%
R60	700	Board gypsum	10	10	0.0%
R60	800	Board gypsum	5	5	0.0%
R90	400	Board gypsum	33	30	9.1%
R90	500	Board gypsum	27	25	7.4%
R90	600	Board gypsum	21	20	4.8%
R90	700	Board gypsum	16	15	6.3%
R90	800	Board gypsum	10	10	0.0%
R120	400	Board gypsum	41	38	7.3%
R120	500	Board gypsum	34	32	5.9%
R120	600	Board gypsum	28	26	7.1%
R120	700	Board gypsum	21	21	0.0%
R120	800	Board gypsum	14	14	0.0%

Na Tabela 6.5, Tabela 6.6 e Tabela 6.7 apresentam-se comparações em que se adotou a curva de hidrocarbonetos.

Tabela 6.5 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 3 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		
			Fire Protection Analysis	Elefir	Dif.
R30	400	Spray mineral fibre	16	16	0.0%
R30	500	Spray mineral fibre	12	12	0.0%
R30	600	Spray mineral fibre	9	9	0.0%
R30	700	Spray mineral fibre	6	6	0.0%
R30	800	Spray mineral fibre	4	4	0.0%
R60	400	Spray mineral fibre	31	30	3.2%
R60	500	Spray mineral fibre	23	23	0.0%
R60	600	Spray mineral fibre	17	17	0.0%
R60	700	Spray mineral fibre	13	12	7.7%
R60	800	Spray mineral fibre	8	8	0.0%
R90	400	Spray mineral fibre	45	43	4.4%
R90	500	Spray mineral fibre	34	33	2.9%
R90	600	Spray mineral fibre	25	25	0.0%
R90	700	Spray mineral fibre	19	18	5.3%
R90	800	Spray mineral fibre	12	12	0.0%

Tabela 6.6 - Comparação realizada com proteção em torno do perfil exposto em 4 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		
			Fire Protection Analysis	Elefir	Dif.
R30	400	Spray perlite	18	17	5.6%
R30	500	Spray perlite	13	13	0.0%
R30	600	Spray perlite	10	10	0.0%
R30	700	Spray perlite	7	7	0.0%
R30	800	Spray perlite	5	5	0.0%
R60	400	Spray perlite	31	30	3.2%
R60	500	Spray perlite	25	24	4.0%
R60	600	Spray perlite	19	19	0.0%
R60	700	Spray perlite	14	14	0.0%
R60	800	Spray perlite	9	9	0.0%
R90	400	Spray perlite	43	41	4.7%
R90	500	Spray perlite	34	34	0.0%
R90	600	Spray perlite	27	27	0.0%
R90	700	Spray perlite	21	21	0.0%
R90	800	Spray perlite	14	14	0.0%

Tabela 6.7 - Comparação realizada com proteção em caixão com perfil exposto em 3 lados a fogo por combustão de hidrocarbonetos

Fire Rating	Temp. Crítica	Protection System	Espessura de proteção (mm)		
			Fire Protection Analysis	Elefir	Dif.
R30	400	Board vermiculite and cement	15	15	0.0%
R30	500	Board vermiculite and cement	12	11	8.3%
R30	600	Board vermiculite and cement	9	9	0.0%
R30	700	Board vermiculite and cement	7	6	14.3%
R30	800	Board vermiculite and cement	4	4	0.0%
R60	400	Board vermiculite and cement	27	26	3.7%
R60	500	Board vermiculite and cement	21	21	0.0%
R60	600	Board vermiculite and cement	17	16	5.9%
R60	700	Board vermiculite and cement	13	12	7.7%
R60	800	Board vermiculite and cement	8	8	0.0%
R90	400	Board vermiculite and cement	37	36	2.7%
R90	500	Board vermiculite and cement	30	29	3.3%
R90	600	Board vermiculite and cement	24	23	4.2%
R90	700	Board vermiculite and cement	18	18	0.0%
R90	800	Board vermiculite and cement	12	12	0.0%
R120	400	Board vermiculite and cement	46	44	4.3%
R120	500	Board vermiculite and cement	37	36	2.7%
R120	600	Board vermiculite and cement	30	29	3.3%
R120	700	Board vermiculite and cement	23	23	0.0%
R120	800	Board vermiculite and cement	16	16	0.0%

Como se verifica pela comparação efetuada existem situações em que ocorrem discrepâncias nos resultados obtidos. Não se obteve uma razão válida para essas diferenças, que apesar de pequenas, não seriam expectáveis, uma vez que as fórmulas para o cálculo analítico estão perfeitamente definidas e analisadas no livro do Dr. Paulo Vila Real que acompanha o *software* Elefir. Para o esclarecimento objetivo da razão das diferenças encontradas seria necessário conhecer com rigor o código do programa Elefir faz no desenvolvimento do seu cálculo.

7 DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO AUTOMÁTICO DE PROJETO DE VIGAS MISTAS

7.1 INTRODUÇÃO

O programa de cálculo foi denominado de *Fire Protection Analysis – Composite Beams (FirePro -Composite Beams)*, tendo também sido desenvolvido em ambiente VBA do *Excel*, apresentando o aspeto gráfico constante da Figura 7.1 quando é iniciado.

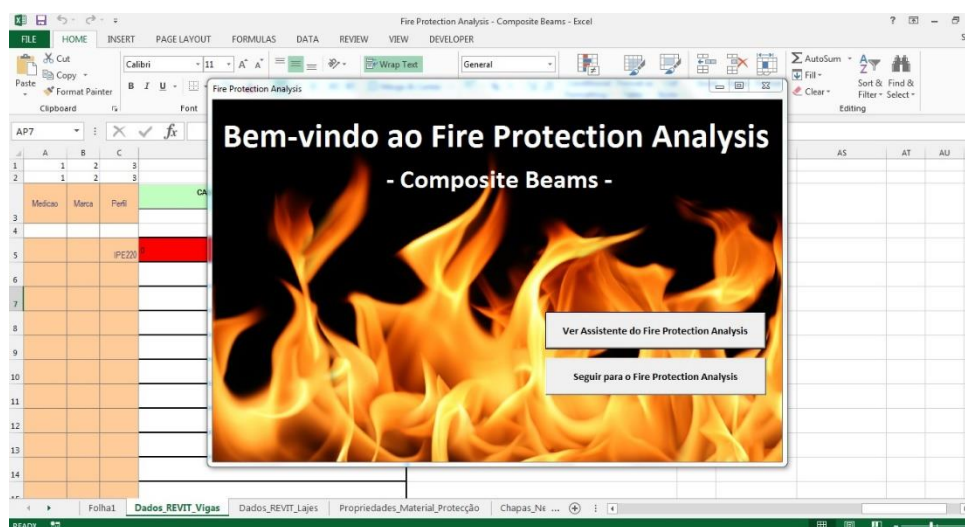


Figura 7.1 – Interface gráfico de apresentação do *FirePro - Composite Beams*

O objetivo do processo é a determinação das necessidades de proteção das vigas mistas decorrente da sua análise estrutural em situação de incêndio. A necessidade de efetuar a quantificação de proteção deve-se ao facto do ARSA não a realizar e à inacessibilidade a programas que a efetuem com a flexibilidade pretendida.

A metodologia adotada para a análise ao fogo das vigas mistas baseou-se no método prescritivo, com análise por elementos e cálculo simplificado para a determinação da evolução da temperatura e resistência mecânica de acordo com a EN 1994-1-2 (2008), à semelhança do que havia sido realizado com a ferramenta *FirePro – Steel Elements*.

Para a realização do cálculo estrutural é necessário um prévio dimensionamento à temperatura ambiente, incluindo a combinação de ações em situação de acidente, sendo os resultados de seguida inseridos no programa. O dimensionamento pode ser realizado através de folhas de cálculo, ou com recurso a programas existentes para o efeito, sendo que para o atual trabalho foi utilizado o programa ABC

disponibilizado de forma gratuita pela Arcelor Mittal. De realçar que os esforços são determinados para cada elemento tendo em conta as condições de apoio e de fronteira definidas para cada um. Adicionalmente, nas vigas mistas, para além do perfil metálico que desempenha funções estruturais, existem também o betão, as armaduras, e os conetores, sendo que todos estes elementos são afetados pelos efeitos do aumento da temperatura devido a conseqüente redução das propriedades mecânicas.

Embora o programa tenha sido submetido a uma exaustiva análise de resultados, não foi possível a comparação com programas de cálculo comerciais que efetuem cálculos semelhantes. Para a validação foram realizadas comparações dos valores obtidos para a resistência da seção mista, posicionamento do eixo neutro, resistência da conexão e espessuras de proteção, utilizando a temperatura crítica identificada pelo FirePro-CompositeBeams e o tempo de exposição ao fogo em que a mesma foi atingida.

Com as temperaturas críticas obtidas realizaram-se cálculos de validação manuais tendo por base consulta das tabelas dos fatores de redução das propriedades mecânicas do aço e betão. Pelo facto de os cálculos não serem automatizados, envolvendo apenas a utilização de folhas de cálculo desenvolvidas especificamente para efeitos de comparação, não se julgou conveniente detalhar a etapa de validação.

7.2 INTERAÇÃO ENTRE OS PROGRAMAS REVIT, EXCEL E ABC

O processo de dimensionamento de vigas mistas em situação de incêndio obedece ao fluxo de informação entre programas indicado na Figura 7.2.

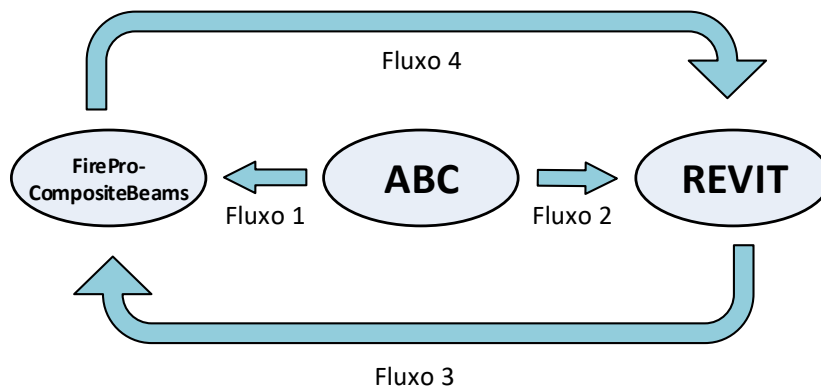


Figura 7.2 – Fluxos de informação entre os programas intervenientes no processo de dimensionamento de vigas mistas

➤ Fluxo ABC – Revit (Fluxo 1)

É realizado um dimensionamento à temperatura ambiente com recurso ao programa ABC da *Arcelor Mittal*, onde são definidas as características geométricas e mecânicas das lajes, vigas, conetores e

armaduras, assim como a disposição das vigas principais, secundárias e travamentos. Depois de definidos estes elementos é realizado o modelo em *Revit*, processo este que não possui qualquer automatismo. A cada elemento do modelo são desde já atribuídas diversas características importantes para a análise que se seguirá no *FirePro-CompositeBeams*.

➤ **Fluxo ABC – FirePro-CompositeBeams (Fluxo 2)**

Alguma informação resultante do dimensionamento à temperatura ambiente não é atribuída aos elementos no modelo *Revit*, quer devido à impossibilidade de atribuição de alguns dados, como à morosidade. Este processo é portanto manual, ou seja, sem recorrer a qualquer automatismo. São exemplos desses dados o tipo de laje colaborante, a identificação de vigas principais e secundárias, largura efetiva, esforços, etc.

➤ **Fluxo Revit – FirePro-CompositeBeams (Fluxo 3)**

A informação relativa às vigas mistas são descritas nos *schedules* criados para o efeito, semelhantes aos *schedules* das estruturas metálicas. A informação pode ser exportada para o *FirePro-CompositeBeams* em formato de ficheiro *.txt, posteriormente convertido para *Excel* e copiado para o programa, ou alternativamente utilizando um *add-in* do *Revit*.

A informação que é partilhada é relativa às propriedades geométricas e mecânicas dos elementos estruturais (perfil, conectores, laje de betão, etc.), e os parâmetros relativos à análise ao fogo (sistema de proteção, faces expostas, tempo de resistência ao fogo, etc.).

➤ **Fluxo FirePro-CompositeBeams – Revit (Fluxo 4)**

Reunida no *FirePro-Composite Beams* a informação proveniente do *Revit* e do ABC, é realizado o cálculo para todas as vigas mistas adicionadas à ferramenta das espessuras de proteção com base no cálculo analítico ou em consulta de tabelas, à semelhança do procedimento utilizado no *FirePro-Steel*. As espessuras são exportadas para o *Revit*, através de um *add-in* ou manualmente, para a realização da análise económica, e caso se justifique, proceder a alterações de modo a otimizar os custos.

7.3 PERSONALIZAÇÃO DO PROGRAMA REVIT

À semelhança do *FirePro-Steel* foram criados dois *schedules* relativos à proteção ao fogo em vigas mistas, um com informação da laje de betão e outro com informação relativa ao perfil de aço e conectores. Foram também acrescentados parâmetros de instância associados ao elemento estrutural viga, os quais dizem respeito às características do conector utilizado na viga mista, como se pode observar na Figura 7.3.

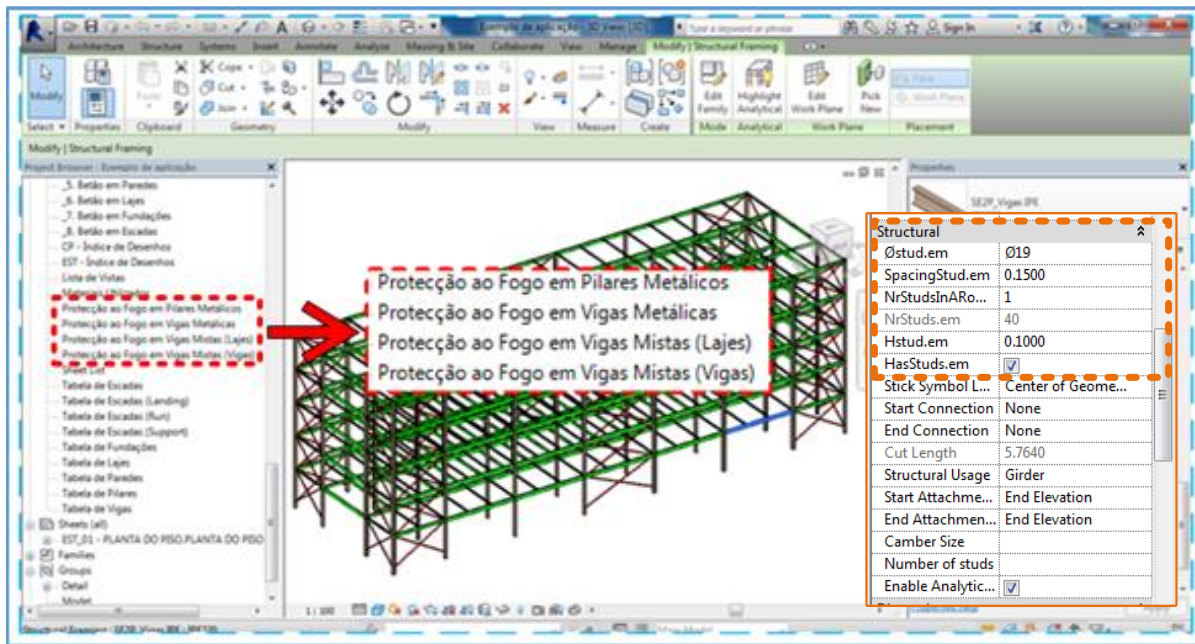


Figura 7.3 – Schedules e parâmetros de instância referentes às vigas mistas

O *schedule* relativo às vigas e conectores apresenta diferenças relativamente ao *schedule* das estruturas metálicas, nomeadamente na área que é transposta para a ferramenta *FirePro-CompositeBeams*. Na Figura 7.4 são apresentadas três zonas dessa área que se distinguem e serão alvo de pormenorização em seguida.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	
Med	Grupo	Perfi	h em	bf em	bf e	bf e	tf em	tf a	tf e	tf em	tf em	A em	Structural	Quant	Comp (m)	Peaz (kg/m)	Peaz (kg)	AL em	Área Perf	Østud	Spacing	Hstud em	NrStuds	Standard em	FireRat	ProtectionSystem em
VCP1	PR270	135.000	10.200	248.6	6.000	0.004595	275.0	0	6.000	36.15	2166.00	0.041	mp	82.48	019	0.100	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCP2	PR200	100.000	8.500	183	5.000	0.002840	275.0	0	4.500	22.40	403.20	0.768	mp	13.82	019	0.100	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCP3	PR180	91.000	8.000	164	5.300	0.002395	275.0	0	6.000	19.80	1128.00	0.896	mp	41.88	019	0.150	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCP4	PR140	73.000	8.900	126.2	4.700	0.001643	275.0	0	4.500	12.90	232.20	0.551	mp	9.92	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS1	PR120	64.000	8.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	5.500	10.40	800.80	0.475	mp	36.56	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS2	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	5.500	10.40	114.40	0.475	mp	5.23	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS3	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	5.500	10.40	114.40	0.475	mp	5.23	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS4	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	5.500	10.40	114.40	0.475	mp	5.23	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS5	PR150	85.000	5.700	88.6	4.100	0.001032	275.0	0	3.500	8.10	793.00	0.400	mp	39.20	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS6	PR150	85.000	4.700	88.6	4.100	0.001032	275.0	0	3.500	8.10	113.40	0.400	mp	5.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS7	PR100	65.000	8.000	86.6	4.100	0.001032	275.0	0	3.500	8.10	113.40	0.400	mp	5.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VCS8	PR100	65.000	8.000	86.6	4.100	0.001032	275.0	0	3.500	8.10	113.40	0.400	mp	5.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VVP1	PR300	170.000	10.700	334.6	8.000	0.007273	275.0	0	6.000	57.10	13704.00	1.353	mp	324.72	019	0.100	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VVP2	PR300	150.000	10.700	276.6	7.100	0.005381	275.0	0	4.500	42.20	3036.40	1.160	mp	83.52	019	0.100	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VVP3	PR270	135.000	10.200	248.6	6.000	0.004595	275.0	0	6.000	36.15	8684.00	0.841	mp	249.84	019	0.150	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VVP4	PR220	110.000	9.200	201.6	5.900	0.003337	275.0	0	4.500	26.20	1806.40	0.848	mp	61.06	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS1	PR160	82.000	7.400	145.2	5.000	0.002009	275.0	0	5.500	15.80	4066.40	0.623	mp	191.88	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS2	PR160	82.000	7.400	145.2	5.000	0.002009	275.0	0	5.500	15.80	895.20	0.623	mp	27.41	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS3	PR160	82.000	7.400	145.2	5.000	0.002009	275.0	0	5.500	15.80	895.20	0.623	mp	27.41	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS4	PR160	82.000	7.400	145.2	5.000	0.002009	275.0	0	5.500	15.80	895.20	0.623	mp	27.41	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS5	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	3.500	10.40	4076.80	0.475	mp	186.20	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS6	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	3.500	10.40	562.40	0.475	mp	26.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS7	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	3.500	10.40	562.40	0.475	mp	26.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					
VPS8	PR120	64.000	6.300	107.4	4.400	0.001321	275.0	0	3.500	10.40	562.40	0.475	mp	26.60	019	0.200	0.100	1	EN13381	R90	Paint HpCore One 43600					

Figura 7.4 – Pormenor do *schedule* de proteção ao fogo em vigas mistas (vigas e conectores)

A Zona 1, apresentada na Figura 7.5, contém os dados relativos à geometria do perfil metálico, onde são discriminadas as dimensões da alma e dos banzos inferior e superior, uma vez que a distribuição da temperatura não é uniforme em todo o perfil, e por isso fazendo variar a resistência em cada um deles. A

massividade não é um dado incluído na tabela, uma vez que é calculada para cada perfil a partir das suas dimensões, possibilitando o uso de perfis não tabelados, nomeadamente perfis reconstituídos soldados.

ZONA 1

D	E	F	G	H	I	J	K
b.em	bf1.em	bf2.em	tf.em	tf1.em	tf2.em	hi.em	tw.em
135.000			10.200			249.6	6.600
100.000			8.500			183	5.600
91.000			8.000			164	5.300
73.000			6.900			126.2	4.700
64.000			6.300			107.4	4.400
64.000			6.300			107.4	4.400
64.000			6.300			107.4	4.400
64.000			6.300			107.4	4.400
55.000			5.700			88.6	4.100
55.000			5.700			88.6	4.100
55.000			5.700			88.6	4.100
55.000			5.700			88.6	4.100
170.000			12.700			334.6	8.000
150.000			10.700			278.6	7.100

Figura 7.5 – Zona 1 relativa aos dados geométricos dos perfis metálicos

A zona 2 é reservada à tensão de cedência do aço e na zona 3 são definidos os dados relativos à conexão, conforme ilustrado na Figura 7.6.

ZONA 2

M
Structural Materi
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa
275.0 MPa

ZONA 3

T	U	V	W
Østud.	SpacingStud.	Hstud.e	NrStudInARow.
Ø19	0.100	0.100	1
Ø19	0.100	0.100	1
Ø19	0.150	0.100	1
Ø19	0.200	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.205	0.100	1
Ø19	0.100	0.100	1
Ø19	0.100	0.100	1

Figura 7.6 – Zonas 2 e 3 - tensão de cedência do aço e dados da conexão

O *schedule* relativo às lajes de betão, ilustrado na Figura 7.7, serve de repositório para as diferentes lajes utilizadas no projeto, especificando a sua espessura e a tensão de rotura à compressão.

A	B	C
Type	Espe	Structural Material:
LM 25cm	25cm	25.0 MPa
LAV2 19cm	19cm	25.0 MPa
Colaborante 12	12cm	30.0 MPa

Figura 7.7 – Schedule para repositório das lajes de betão

O Revit incorpora por defeito alguns materiais e as suas propriedades mecânicas, mas a lista existente é muito incompleta, pelo que foi necessário adicionar tipos de aço e betão com as respetivas propriedades mecânicas. Foram introduzidas informações dos aços laminados a quente (EN 10025 (2004)), perfis ocós laminados a quente (EN 10210 (2006)), perfis ocós enformados a frio (EN 10219 (2006)), e de betão (EN 206 (2000)). A Figura 7.8 mostra a interface gráfico que o Revit possui para inserir e consultar os materiais disponíveis na sua base de dados.

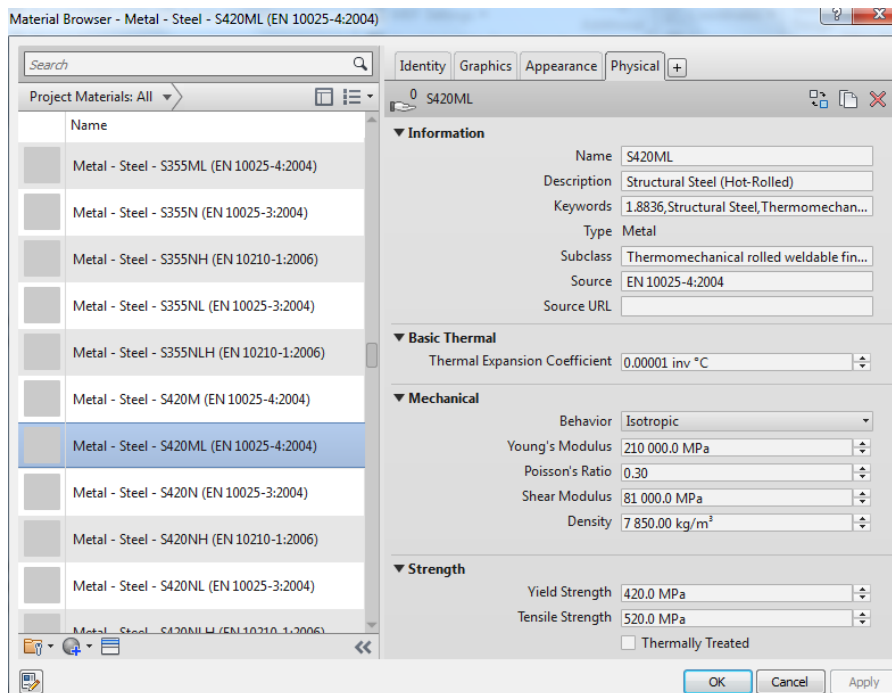


Figura 7.8 – Interface gráfica da base de dados do Revit para materiais

7.4 APRESENTAÇÃO DO FIRE PROTECTION ANALYSIS – COMPOSITE BEAMS

A ferramenta é composta por vários separadores que serão alvo de descrição pormenorizada.

O separador Dados_REVIT_Vigas tem três áreas distintas, conforme ilustra a Figura 7.9, a área 1 é preenchida copiando o conteúdo dos schedules do Revit relativo às lajes mistas, a área 2 é preenchida manualmente e na área 3 são apresentados os resultados do cálculo.

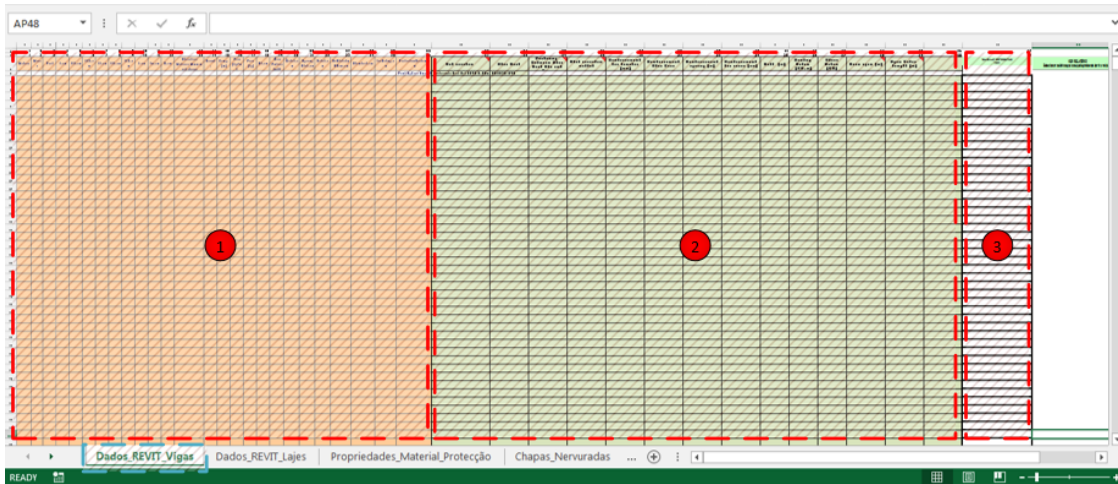


Figura 7.9 – Interface gráfico da folha *Dados_REVIT_Vigas*

Na Figura 7.10 são pormenorizadas as duas primeiras colunas da área 2. A coluna *Slab Selection* é preenchida com o tipo de laje de betão, possuindo um *dropdown* onde surge o conteúdo do separador *Dados_REVIT_Lajes* preenchido com os dados do *schedule* do *Revit* das lajes de betão. A coluna *Steel Deck* é utilizada caso a laje possua chapa na sua face inferior, integrando também um *dropdown* dos dados contidos no separador preenchido manualmente com dados do fabricante.

Type	Thickness	Structural Material	Concrete compression
Colaborante Deck Slab H59S 0.88mm 120mm	120mm	25	
Colaborante Deck Slab H59S 0.88mm 150mm	150mm	25	

Designação	Espessura da chapa (mm)	Altura da nervura (mm)	B1 (mm)	B2 (mm)	L (mm)	B0 (mm)
Comercial	1,25	54	50	122	205	85,5
COFRASTA 70	1	73	87	113	183	100
Colaborante PC 65	1,2	65	45	96,21	215	76,605
OFFELIZ H60	0,7	39	60	105	205	83,5

Figura 7.10 – Pormenor das colunas da área 2 respeitante à seleção das lajes e chapas

As restantes colunas da área 2 são apresentadas na

Positioning Between Steel Deck Ribs and Beam	Stud execution method	Reinforcement bar diameter [mm]	Reinforcement Steel Class	Reinforcement spacing [m]	Reinforcement bar cover [cm]	Beff [m]	Bending Action [KN.m]	Shear Action [KN]	Beam span [m]	Span Critical Length [m]
		16	A400	0.15	3	1	43.63			
		16	A400	0.15	3	0.8	275			4
		16	A400	0.15	3	1	275	200		2

Figura 7.11, correspondendo a dados usados no cálculo da resistência e a esforços instalados na viga mista.

Positioning Between Steel Deck Ribs and Beam	Stud execution method	Reinforcement bar diameter [mm]	Reinforcement Steel Class	Reinforcement spacing [m]	Reinforcement bar cover [cm]	Beff [m]	Bending Action [KN.m]	Shear Action [KN]	Beam span [m]	Span Critical Length [m]
		16	A400	0.15	3	1	43.63			
		16	A400	0.15	3	0.8	275			4
		16	A400	0.15	3	1	275	200		2

Figura 7.11 – Pormenor das restantes colunas da área 2

- *Positioning Between Steel Deck Ribs and Beam* – Posição relativa entre as nervuras da laje colaborante e a viga, seja paralela ou perpendicular (por defeito é assumida a posição perpendicular);
- *Stud execution method* – Técnica de aplicação dos conectores, soldados através da chapa colaborante ou soldados apenas ao perfil, furando a chapa colaborante (por defeito são assumidos soldados através da chapa colaborante);
- *Reinforcement bar diameter* [mm] – Diâmetro dos varões da armadura superior da laje [análise de momento fletor negativo];
- *Reinforcement Steel Class* – Tipo de aço dos varões [análise de momento fletor negativo];
- *Reinforcement spacing* [m] – Espaçamento entre os varões [análise de momento fletor negativo];
- *Reinforcement bar cover* [cm] – Recobrimento da armadura superior da laje [análise de momento fletor negativo];
- *Beff* [m] – Largura efetiva da viga [determinação da resistência ao nível da secção e do elemento];
- *Bending Action* [kN.m] – Momento atuante [combinação de ações acidental];
- *Shear Action* [kN] – Esforço transversal atuante [combinação de ações acidental];
- *Beam span* [m] – Vão da viga (é assumido por defeito o comprimento do elemento de acordo com o desenho, “Coluna O” [determinação da resistência ao nível da secção e do elemento];

- *Span Critical Length* [m] – Vão crítico da viga, que consiste no comprimento entre zonas de momento máximo (positivo e negativo) ou entre o apoio e a zona de momento máximo (por defeito é assumido metade do *Beam span* “Coluna AL” atendendo às condições definidas [determinação da resistência ao nível da secção e do elemento].

Foram criados três separadores (ver Figura 7.12) com os fatores de redução das características do aço do perfil, do betão e das armaduras da viga mista, tendo sido retiradas da EN 1994-1-2 (2008).

	A	B	C	D	E
1					
2	Temperatura do aço [°C]	KE	Kp	Ky	Ku
3	20	1	1	1	1
4	100	1	1	1	1
5	200	0.9	0.807	1	1
6	300	0.8	0.613	1	1
7	400	0.7	0.42	1	1
8	500	0.6	0.36	0.78	0.78
9	600	0.31	0.18	0.47	0.47
10	700	0.13	0.075	0.23	0.23
11	800	0.09	0.05	0.11	0.11
12	900	0.0675	0.0375	0.06	0.06
13	1000	0.045	0.025	0.04	0.04
14	1100	0.0225	0.0125	0.02	0.02
15	1200	0	0	0	0
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					

	A	B	C	D
1		Kc NC	Kc Lc	Extensão
2	Temperatura do betão [°C]	NC	LC	NC
3	20	1	1	2.5
4	100	1	1	4
5	200	0.95	1	5.5
6	300	0.85	1	7
7	400	0.75	0.88	10
8	500	0.6	0.76	15
9	600	0.45	0.64	25
10	700	0.3	0.52	25
11	800	0.15	0.4	25
12	900	0.08	0.28	25
13	1000	0.04	0.16	25
14	1100	0.01	0.04	25
15	1200	0	0	-
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				

	A	B	C	D
1	Temperatura do aço	KE	Kp	Ky
2	20	1	1	1
3	100	1	0.96	1
4	200	0.87	0.92	1
5	300	0.72	0.81	1
6	400	0.56	0.63	0.94
7	500	0.4	0.44	0.67
8	600	0.24	0.26	0.4
9	700	0.08	0.08	0.12
10	800	0.06	0.06	0.11
11	900	0.05	0.05	0.08
12	1000	0.03	0.03	0.05
13	1100	0.02	0.02	0.03
14	1200	0	0	0
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				

Figura 7.12 – Folhas com os fatores de redução

Foi também criado um separador com o desenvolvimento da temperatura ao longo da espessura de betão, conforme ilustra a Figura 7.13.

Estes separadores são utilizados apenas para consulta por parte do programa de forma automatizada, e podem ser ocultadas.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Profundidade [mm]	30	60	90	120	180	240
2	5	535	705				
3	10	470	642	738			
4	15	415	581	681	754		
5	20	350	525	627	697		
6	25	300	469	571	642	738	
7	30	250	421	519	591	689	740
8	35	210	374	473	542	635	700
9	40	180	327	428	493	590	670
10	45	160	289	387	454	549	645
11	50	140	250	345	415	508	550
12	55	125	200	294	369	469	520
13	60	110	175	271	342	430	495
14	80	80	140	220	270	330	395
15	100	60	100	160	210	260	305
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							

Figura 7.13 – Separador com o desenvolvimento da temperatura no betão

O separador Propriedades_Material_Protecção e os separadores dos materiais de protecção tabelados são iguais às do programa *Fire Protection Analysis – Steel Elements*.

Após preenchimento das áreas 1 e 2 o cálculo das espessuras pode ser efetuado, durante o qual é gerado um relatório que posteriormente pode ser consultado, necessitando para o efeito que a folha que se pretende abrir seja seleccionada e seja ativada a opção *VER RELATÓRIO*, conforme se observa na Figura 7.14. Durante o cálculo das espessuras todos os relatórios são criados automaticamente na mesma pasta onde se encontra o programa.

	A	B	C	AM	AO	AP	AQ
1	1	2	3	45	47		48 49
2	1	2	3	39	41		42 43
3	Medicao	Marca	Perfil	Span Critical Length [m]	CALCULAR ESPESURAS [mm]	VER RELATÓRIO Seleccionar as linhas para as quais pretende abrir o relatório	
4							
5			HE300A	3	2.676654673	Resistência ao corte dos conectores insuficiente para mobilizar conexão total	<input type="checkbox"/> Linha5
6			HE300A	4	0.989459846		<input checked="" type="checkbox"/> Linha6
7			HE300A	2	0.585697295		<input type="checkbox"/> Linha7
8							
9							
10							
11							
12							

Figura 7.14 – Cálculo das espessuras de protecção e opções do relatório

Os relatórios estão organizados da seguinte forma:

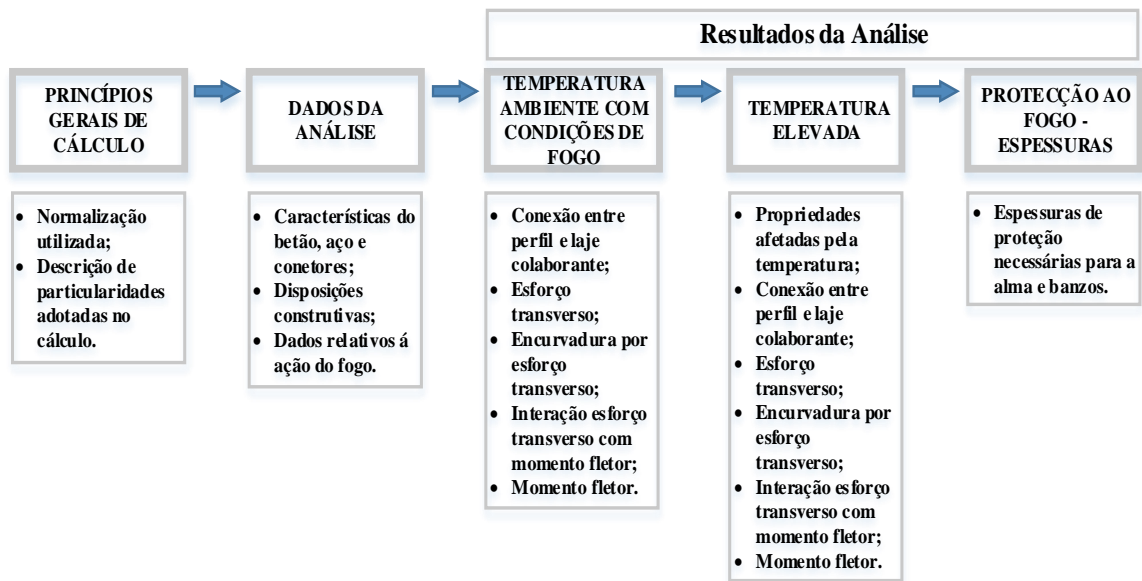


Figura 7.15 – Organização do relatório

O relatório possui também diversa informação complementar que pode ser usada para análise de sensibilidade e validação, e o seu aspeto é ilustrado na Figura 7.16. De salientar que nos princípios gerais de cálculo são descritas as limitações da ferramenta, assim como os pressupostos e metodologias de cálculo utilizadas segundo a EN 1994-1-1 (2009) e EN 1994-1-2 (2008). Para além disso, é identificado o capítulo dos Eurocódigos utilizado para realizar cada um dos cálculos efetuados e listados.

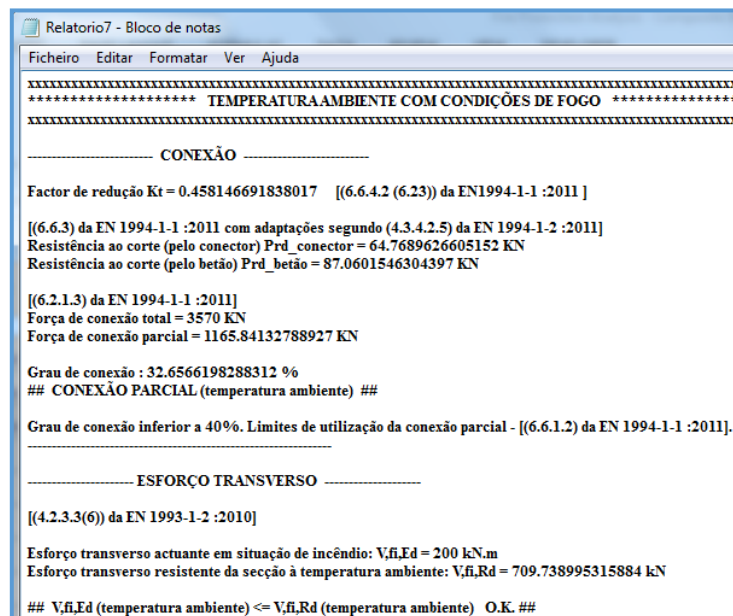


Figura 7.16 – Interface gráfico de relatório

7.5 LIMITAÇÕES DO PROGRAMA FIRE PROTECTION ANALYSIS – COMPOSITE BEAMS

As principais limitações do *FirePro-CompositeBeams* são as seguintes:

a) Resistência ao corte longitudinal no betão

O programa não efetua a verificação da resistência ao corte longitudinal no betão, não obstante ser um critério a analisar segundo a EN 1994-1-2 (2008).

b) Encurvadura por esforço transversal

A resistência à encurvadura por esforço transversal é dependente de diversos fatores como o número e disposição de reforços transversais e longitudinais e da sua rigidez. Para não tornar tão complexa a quantidade de dados a inserir na ferramenta optou-se por assumir por defeito a existência de reforços transversais rígidos na alma.

c) Encurvadura lateral

A EN 1994-1-2 (2008) não refere a encurvadura lateral como um fenómeno a verificar na análise ao fogo de vigas mistas. De qualquer modo, a EN 1994-1-2 (2008) estipula que um banzo de aço ligado a uma laje de betão pode ser considerado lateralmente estável desde que seja impedida qualquer instabilidade lateral da laje de betão.

d) Classe da secção

O cálculo da resistência à flexão pela teoria da plasticidade apenas é válido para secções das classes 1, 2 e 3 (exclui a classe 4), e para avaliação da resistência ao esforço transversal a teoria da plasticidade só é adequada para secções de classes 1 e 2. A determinação da classe da secção mista não é efetuada pelo programa.

e) Evolução da temperatura no betão

A evolução da temperatura foi determinada com base em valores tabelados fornecidos no anexo D da EN 1994-1-2 (2008), efetuando-se interpolações para valores intermédios. No entanto, esta tabela apenas é válida para o fogo padrão e apenas apresenta valores de temperatura a partir dos 30 minutos de exposição. Isto obriga a que a ferramenta de cálculo assumira uma temperatura correspondente a esse período mínimo de tempo, mesmo quando a duração é inferior a 30 minutos. Para além disso, não é dada a indicação da temperatura superficial no betão, tendo-se optado por desprezar a camada até à espessura

a partir da qual existem dados de temperatura. Em consequência, foram adotadas opções conservativas na falta de informação necessária para um cálculo mais preciso.

f) Conectores

Os critérios relativos à geometria, disposições construtivas e métodos de execução dos conectores, não são alvo de verificação por parte desta ferramenta. Assume-se que estas verificações foram realizadas no dimensionamento à temperatura ambiente.

g) Conexão parcial

A ferramenta de cálculo não permite a conexão parcial para momentos negativos, tal como estipula a EN 1994-1-1 (2009). O anexo E da EN 1994-1-2 (2008), apresenta um critério de limitação da compressão no betão para momentos negativos, entendendo-se no entanto que não é coerente com o estipulado na parte 1-1. Para momentos positivos não foi estabelecido um limite para o grau de conexão, sendo dado um aviso caso este seja inferior a 40%. O grau de conexão de 40% corresponde ao valor mínimo de conexão parcial que é permitido pela EN 1994-1-1 (2009).

h) Tensão de cedência do aço

A tensão de cedência do aço depende da espessura nominal do componente da secção. Para valores de espessura entre 40 mm e 80 mm há uma redução da tensão que não é prevista na ferramenta de cálculo. Esta opção foi tomada por não serem frequentes os casos em que isto ocorre, podendo no entanto este valor ser alterado manualmente no *FirePro-CompositeBeams*, ou até mesmo prever-se esta situação no próprio Revit.

8 CASO DE ESTUDO

O caso de estudo desenvolvido teve como objetivo testar as ferramentas realizadas, no contexto de um caso prático e real de um gabinete de projeto, tendo-se procurado obter soluções que garantam a segurança e que sejam o mais económicas possível.

O caso de estudo é um edifício de habitação multifamiliar na cidade do Porto, constituído por rés-do-chão e quatro pisos, com cobertura horizontal não acessível. O pavimento do rés-do-chão apoia diretamente no solo de fundação.

8.1 ARQUITETURA

A geometria em planta é retangular, sem varandas, e regular em altura, dispondo a cobertura de platibanda em todo o seu perímetro.

O edifício possui dimensões em planta 39,00 m x 12,50 m, e uma área de implantação de 487,50 m², e uma altura de 13,50 m, onde se desenvolvem 5 pisos de habitação com pé direito de 2,70 m e a cobertura.

Por simplificação optou-se por uma distribuição linear e simétrica dos pilares, para facilitar e aligeirar o desenho, mantendo intactos os objetivos de integração das ferramentas descritas anteriormente. Daí resulta que não tenha sido levado em conta eventuais constrangimentos no posicionamento dos pilares com a disposição arquitetônica, assim como também não foi considerado núcleo rígido para a caixa de escadas e poço de elevador.

A planta do edifício e um corte são representados na Figura 8.1 e na Figura 8.2, respetivamente.

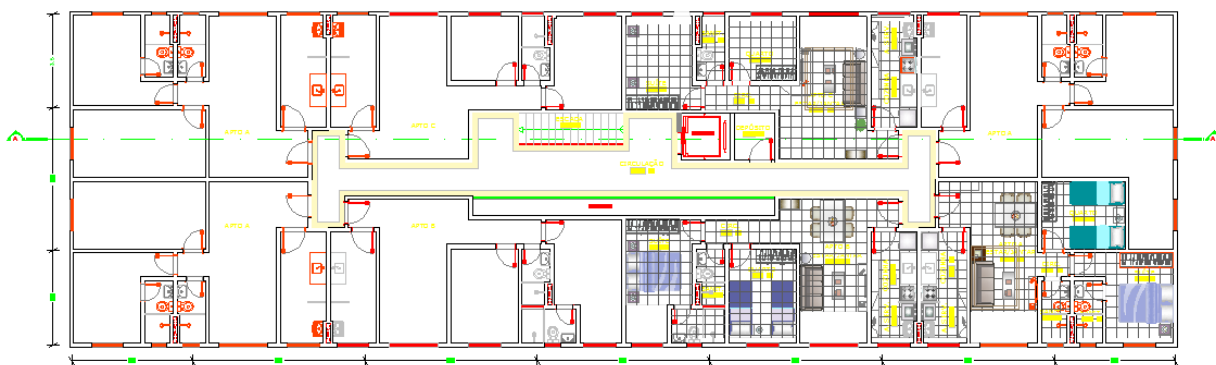


Figura 8.1 – Planta do piso tipo do edifício



Figura 8.2 – Corte do edifício

8.2 CONCEÇÃO ESTRUTURAL

Para a execução da estrutura serão utilizados pilares metálicos, vigas mistas e lajes colaborantes.

Em conjunto com a equipa da SE2P foi definido um esboço inicial da estrutura no que diz respeito a pilares, vigas e travamentos. De salientar que a disposição inicial poderá ser alterada em função do cálculo estrutural que seja efetuado, em especial ao nível dos travamentos que poderão não ser suficientes, uma vez que é necessário garantir a rigidez horizontal da estrutura.

Na Figura 8.3, Figura 8.4 e Figura 8.5, os pilares são representados a vermelho, as vigas a verde e os travamentos a azul. São apresentadas também as dimensões que foram usadas na modelação.

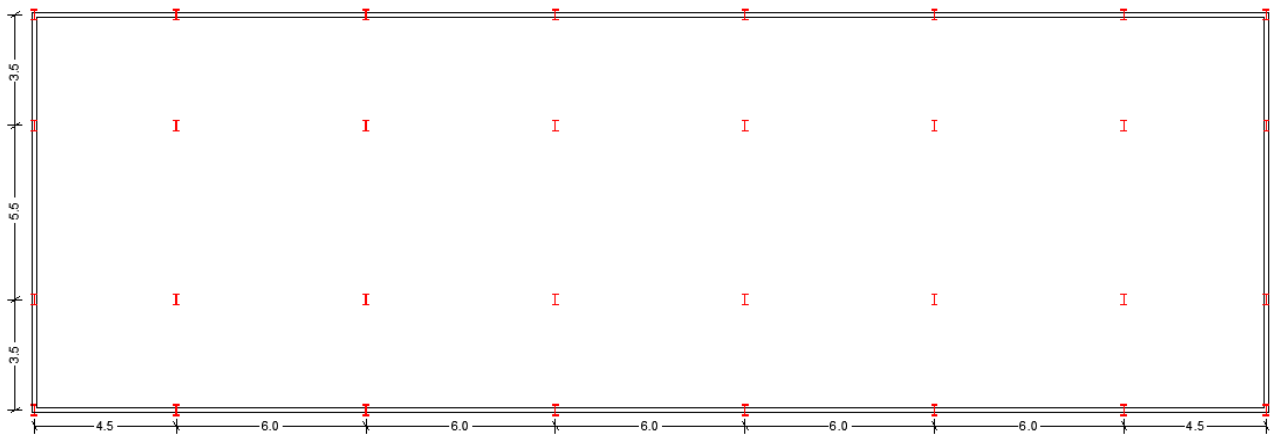


Figura 8.3 – Planta estrutural do edifício

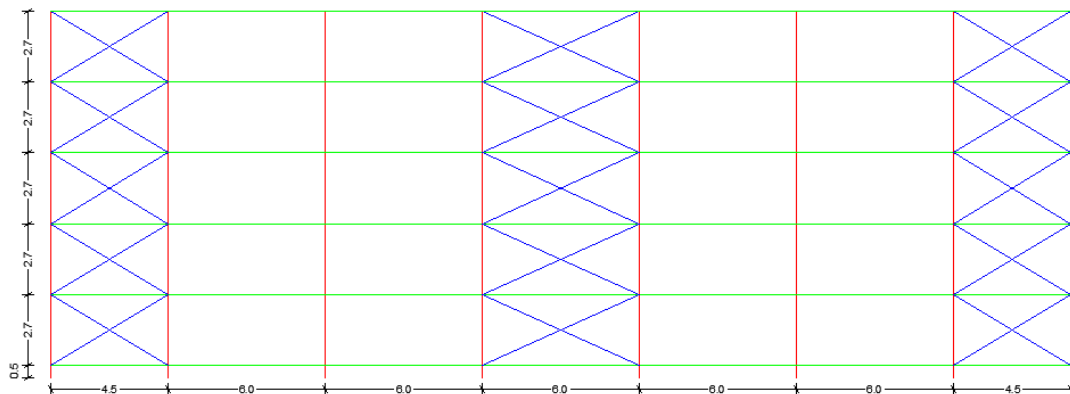


Figura 8.4 – Alçado estrutural da fachada frontal e traseira

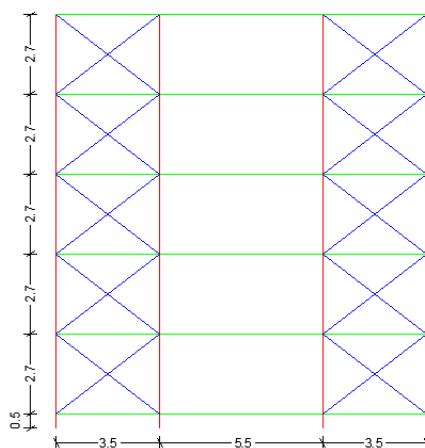


Figura 8.5 – Alçado estrutural das laterais

Os pilares serão executados com perfis do tipo “HE” com os banzos paralelos à fachada maior do edifício, porque assim facilita o aparafusamento às vigas principais que são paralelas à maior fachada. Por outro lado, não estará a ser a maior inércia do perfil mobilizada na direção mais desfavorável, mas como são aplicados travamentos, estes devem emprestar rigidez suficiente à estrutura.

Para as vigas são usados perfis do tipo “IPE”, com a alma na vertical, aproveitando a maior inércia do perfil para a flexão no plano vertical. As vigas principais são paralelas à maior dimensão do edifício e as secundárias perpendiculares.

As nervuras da laje colaborante serão paralelas às vigas principais, tendo assim que vencer um menor vão, que consiste na distância entre vigas secundárias.

Os travamentos trabalham essencialmente à tração e compressão, tendo por isso sido adotados perfis circulares “CHS” que são pouco suscetíveis ao enfunamento e a fenómenos de instabilidade.

O material adotado foi o aço S 275.

8.3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

Foi realizada a modelação da estrutura no programa *Revit*, transposta de seguida para o ARSA através de um *add-in* disponível no *Revit* designado “*Robot Structural Analysis Link*”. O modelo em *Revit* é representado na Figura 8.6 e o importado no ARSA é ilustrado na Figura 8.7.

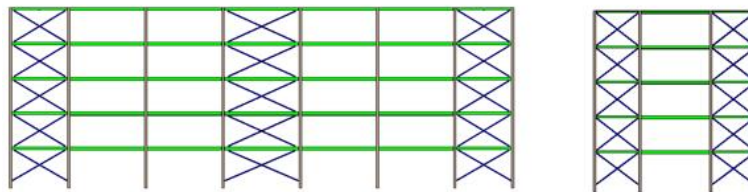
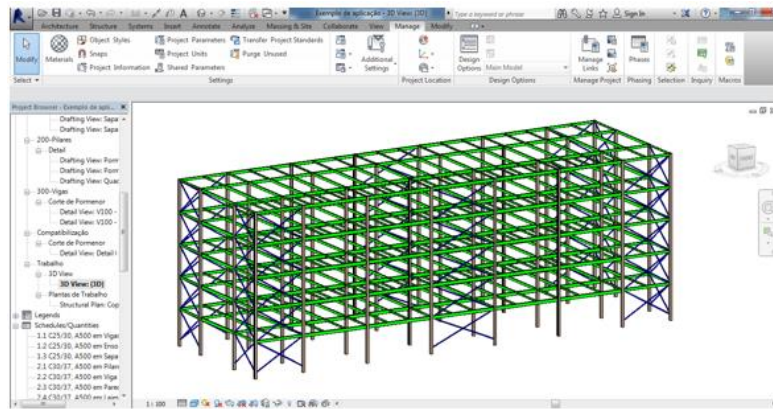


Figura 8.6 – Modelação da estrutura em Revit

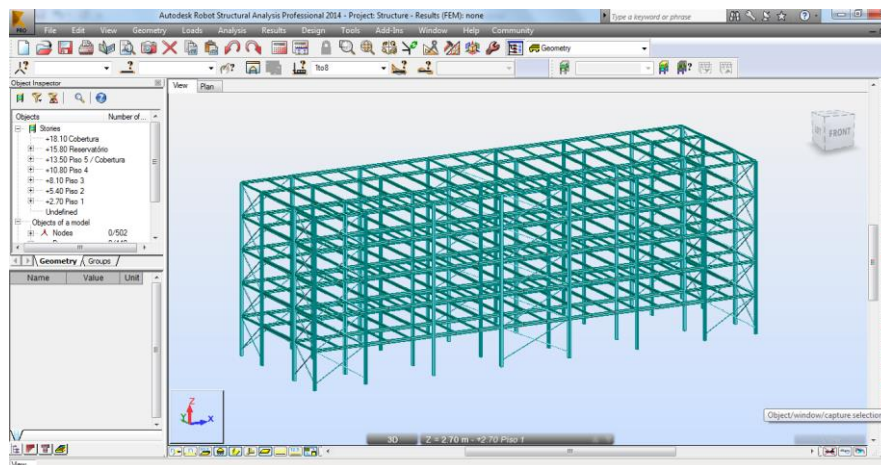


Figura 8.7 - Modelação da estrutura em ARSA

O ARSA é um programa de cálculo de estruturas metálicas muito prático e eficaz, mas requer cuidado e atenção com diversos pormenores que serão referidos ao longo do trabalho. Relativamente às vigas mistas não efetua o seu dimensionamento, sendo necessário recorrer a outro software para o efeito, o mesmo ocorrendo com as lajes mistas com chapa colaborante. Os pilares e os contraventamentos são calculados com auxílio do programa.

Relativamente ao modelo importado do Revit foi feita uma alteração, a qual consistiu no prolongamento dos pilares da fachada para a criação das platibandas no perímetro exterior do edifício.

As sapatas que sustentam os pilares são simuladas através de apoios de encastramento que restringem todos os graus de liberdade.

Não foram modeladas as paredes de fachada nem as lajes, pelo que foi necessário simular a sua existência através de *claddings*. Estes formam uma área onde é possível introduzir cargas distribuindo-as para os pilares e vigas. Os *claddings* das fachadas e platibandas serviram para inserir as ações do vento e os das lajes para inserir o peso da laje, restantes cargas permanentes e sobrecargas.

Para além de simular a existência das lajes, foi necessário simular a rigidez que esta proporciona à estrutura através de *rigid links*. Ao utilizar esta função foi possível garantir que os nós dos pilares ao nível de cada piso não têm deslocamentos relativos entre si, ou seja, foi tido em conta o efeito de diafragma rígido proporcionado pela laje. O modelo de cálculo encontra-se representado na Figura 8.8.

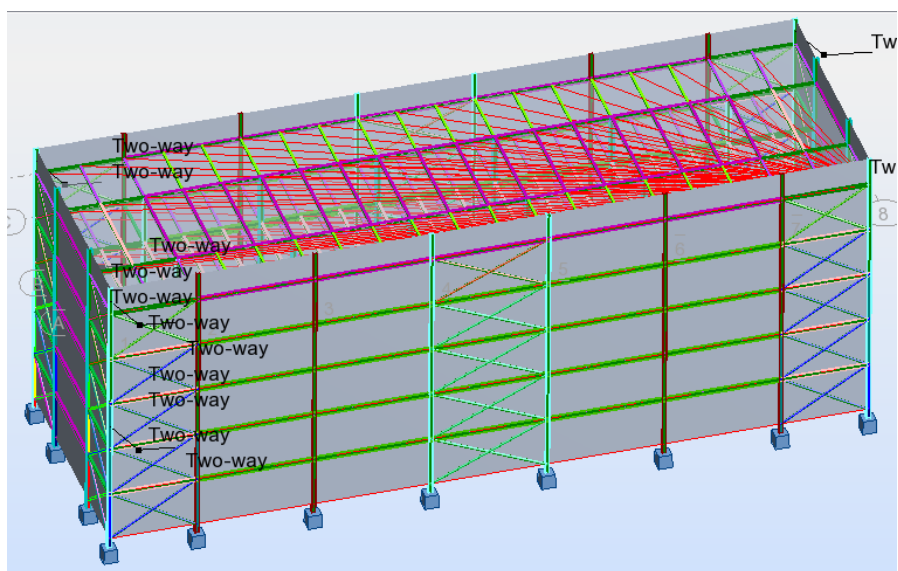


Figura 8.8 – Modelo de cálculo do ARSA

Entre vigas e pilares serão adotadas ligações com liberdade de rotação, impedindo a ocorrência de momentos negativos nas vigas, possibilitando obter o máximo rendimento das vigas mistas pelo facto de a laje de betão trabalhar totalmente à compressão e o perfil metálico trabalhar à tração.

Considerou-se que os pilares apresentam continuidade desde a fundação até à cobertura uma vez que não estão sujeitos a momentos fletores significativos.

Os contraventamentos foram definidos como elementos sujeitos apenas a esforços axiais.

As vigas mistas foram dimensionadas com o programa ABC da Arcelor Mittal e as lajes colaborantes com H60 Calculator da empresa O FELIZ.

8.4 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL EM CONDIÇÕES NORMAIS DE TEMPERATURA

O dimensionamento estrutural foi realizado de forma a obter o melhor compromisso entre a segurança estrutural e a poupança de aço, sem tentar antecipar qual a melhor solução para o posterior dimensionamento em situação de incêndio. O dimensionamento foi realizado para os pilares, contraventamentos, lajes, vigas mistas, tanto em estado limite último como para a ação sísmica.

8.4.1 Ações

As ações a caracterizar serão discriminadas por categorias, sendo elas, as ações permanentes, restantes cargas permanentes, ações variáveis e ação sísmica.

8.4.1.1 Ações permanentes

Na Tabela 8.1 estão descritas as ações permanentes consideradas no dimensionamento da estrutura em condições normais de temperatura.

Tabela 8.1 – Ações permanentes consideradas no dimensionamento a temperatura ambiente

Categoria	Tipo de ação	Zonas de atuação	Norma	Valor
Cargas Permanentes (G)	Peso próprio da laje	Toda a estrutura	EN 1991-1-1	2,18 kN / m ²
	Peso próprio dos perfis	Toda a estrutura		77,01 kN / m ³
	Peso próprio das paredes de fachada	Distribuída pelas vigas perimetrais dos pisos		8,00 kN / m
	Peso próprio da platibanda	Distribuída pelas vigas perimetrais da cobertura		2,85 kN / m

O peso dos perfis é determinado automaticamente pelo ARSA e atualizado automaticamente cada vez que se adicione ou altere um perfil ou material.

Para a determinação do peso próprio das paredes de fachada foi considerada uma solução de parede de tijolo duplo de 15 + 7 cm com isolamento e reboco em ambas as faces. A solução para a platibanda foi de tijolo de 15 cm rebocada em ambas as faces com uma altura de 1,5 m.

O peso próprio da laje pode ser atualizado no modelo de Revit após o devido dimensionamento das lajes mistas.

8.4.1.2 Restantes cargas permanentes

Na Tabela 8.2 estão descritas as restantes cargas permanentes consideradas no dimensionamento da estrutura em condições normais de temperatura.

Tabela 8.2 – Restantes cargas permanentes consideradas no dimensionamento a temperatura ambiente

Categoria	Tipo de ação	Zonas de atuação	Norma	Valor
Restantes Cargas Permanentes (RCP)	Revestimentos	Distribuída pela área dos pisos e cobertura	EN 1991-1-1	2,50 kN / m ²
	Paredes divisórias	Distribuída pela área dos pisos	RSA	1,76 kN / m ²

Na consideração das paredes divisórias foi usado o artigo 15º do RSA, onde o peso das paredes divisórias foi considerado como uma carga permanente uniformemente distribuída em todo o pavimento. Tal é admissível uma vez que o pavimento tem um comportamento de membrana rígida, distribuindo as cargas pela sua área. O valor da carga é obtido multiplicando o seu peso pelo pé-direito e tomando 40% do valor obtido, fator este indicado no artigo como correspondente a pavimentos de habitação.

8.4.1.3 Ações variáveis

As ações variáveis consideradas foram a temperatura, o vento e a sobrecarga.

Os diferenciais de temperatura nas faces de um elemento dão origem a expansões e contrações que provocam esforços que devem ser considerados no dimensionamento. A componente da variação uniforme de temperatura de um elemento estrutural, ΔT_u , segundo a EN 1991-1-5 é dada por:

$$\Delta T_u = T - T_0 \quad (7.1)$$

onde,

$$T = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (7.2)$$

onde,

T_{in} – temperatura do ar ambiente interior (pelo Quadro 5.1 do Anexo Nacional da EN 1991-1-5 assume o valor de 25°C para o Verão e de 18°C para o Inverno);

T_{out} – temperatura do ar ambiente exterior.

Foi distribuída uma componente de variação diferencial ao longo do eixo z (ΔT_{Mz}) e uma outra ao longo do eixo y (ΔT_{My}).

Tabela 8.3 – Valores da distribuição de temperatura segundo a componente de variação uniforme ΔT_u





Estação	Orientação	Fachada	Cobertura	Interior
Caso Verão 	Norte	15,5 °C	-	10 °C
	Sul	16,85 °C	-	
	Oeste	20 °C	20 °C	
	Este	15,5 °C	-	
Caso Inverno 	Norte	-6 °C	-6 °C	3 °C
	Sul	-6 °C		
	Oeste	-6 °C		
	Este	-6 °C		

Tabela 8.4 - Valores da distribuição de temperatura segundo as componentes diferenciais ΔT_{Mz} e ΔT_{My}

Estação	Orientação	Fachada	Cobertura	Interior
Caso Verão 	Norte	-5,5 °C	-	0 °C
	Sul	-6,85 °C	-	
	Oeste	-20 °C	-20 °C	
	Este	-5,5 °C	-	
Caso Inverno 	Norte	18 °C	18 °C	0 °C
	Sul	18 °C		
	Oeste	18 °C		
	Este	18 °C		

A ação do vento nas fachadas foi determinada pela EN1991-1-4 (2005), tendo-se considerado o vento a incidir nas fachadas Oeste, Este, Norte e Sul, tendo-se incluindo também a ação na platibanda. No caso 1 e caso 2 o vento incide perpendicularmente à maior fachada, e no caso 3 e caso 4 incide perpendicularmente à menor fachada, sendo os valores em cada caso simétricos aos que se encontram na Figura 8.9.

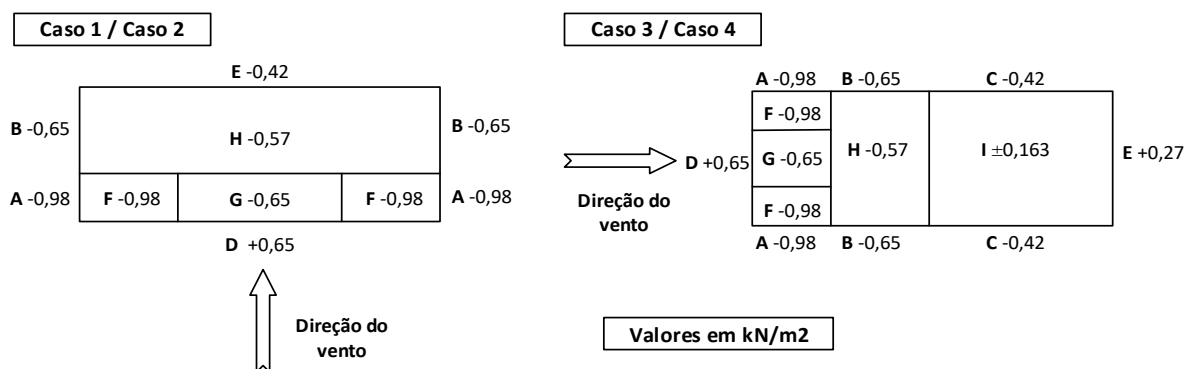


Figura 8.9 – Pressões dinâmicas do vento nas fachadas e cobertura do edifício nas diferentes zonas previstas na norma

A sobrecarga dos pavimentos segundo o Quadro 6.2 do Anexo Nacional da EN 1991-1-1 (2009) toma o valor de 2.0 kN/m^2 , por ser a preconizada para um pavimento de Categoria A, relativa a atividades domésticas e residenciais.

A sobrecarga da cobertura segundo o Quadro 6.10 do Anexo Nacional da EN 1991-1-1 (2009) toma o valor de 0.40 kN/m^2 , previsto para coberturas não acessíveis, exceto para operações de manutenção e reparação correntes (categoria H).

8.4.1.4 Ação sísmica

Para efeitos de análise sísmica foi efetuada uma análise modal por espectro de resposta, contabilizando-se as ações horizontais segundo as duas direções ortogonais.

A determinação dos modos de vibração que contribuem significativamente para a resposta global da estrutura foi realizada pelo programa ARSA. Para a análise sísmica foram selecionados os modos de vibração cuja soma das massas modais efetivas fosse superior a 90% da massa da estrutura.

O espectro de cálculo para a análise sísmica foi definido pelas expressões indicadas na EN 1998-1, utilizando-se um coeficiente de comportamento de 1,50. Este coeficiente foi estabelecido de acordo com o estipulado no Eurocódigo para estruturas metálicas com comportamento estrutural de baixa dissipação. Os dados utilizados para a determinação do espectro de resposta de cálculo estão indicados na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 - Dados utilizados para determinação do espectro de resposta de cálculo

Dados do espectro	Sismo tipo I	Sismo tipo II
Zona Sísmica	1,6	2,5

$\alpha_{gR} [m/s^2]$	0,35	0,8
$S_{m\acute{a}x}$	1,35	1,35
TB [s]	0,1	0,1
TC [s]	0,6	0,25
TD [s]	2	2
Coefficiente de comportamento (q)	1,5	
Coefficiente do limite inferior do espectro (β)	0,2	

8.4.2 Combinação de ações a temperatura normal

As combinações de ações utilizadas para o dimensionamento inicial em condições de temperatura normal foram o Estado Limite Último (a) e a Ação Sísmica (b).

a) Estado Limite Último

Para o dimensionamento das vigas mistas as combinações de ações para os estados limites últimos foram realizadas no programa ABC, tendo-se determinado os esforços dessas ações com o auxílio do ARSA e escolhida a laje com recurso ao programa H60. Contudo, no dimensionamento dos pilares e contraventamentos as combinações foram calculadas no ARSA, como exemplificado na Figura 8.10.

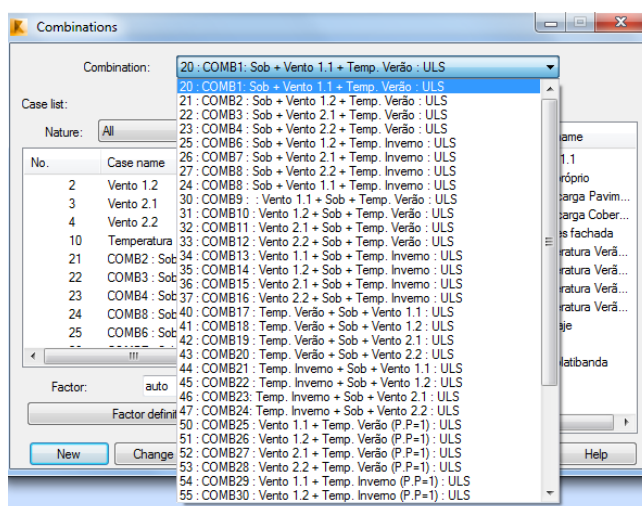


Figura 8.10 – Combinações de realizadas no ARSA

No cálculo dos esforços combinados das vigas mistas foram consideradas todas as cargas verticais, incluindo o vento na cobertura e as cargas lineares do peso próprio das platibandas e das paredes de fachada.

b) Ação sísmica

O efeito da ação sísmica apenas foi considerado para o dimensionamento de pilares e contraventamentos. Na sua quantificação foram consideradas todas as massas associadas às forças gravíticas e às parcelas quase permanentes das sobrecargas, combinando as cargas permanentes com a sobrecarga:

$$M = \left(\sum G_{K,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{K,i} \right) / g \quad (7.1)$$

$$\text{com: } \psi_{E,i} = \varphi \cdot \psi_{2i}$$

onde,

$$\varphi = 0,8 \text{ para pisos com ocupações correlacionadas.}$$

Adicionalmente, para além dos efeitos das componentes horizontais da ação sísmica com atuação independente, foi considerada a possibilidade da não coincidência da ativação da ação sísmica segundo as direções do edifício, conforme preconizado pela norma correspondente através das expressões seguintes:

$$E_{E1} = E_{Edx} \pm 0,30 \cdot E_{Edy} \quad (7.2)$$

$$E_{E2} = 0,30 \cdot E_{Edx} \pm E_{Edy} \quad (7.3)$$

em que E_{Edx} são os esforços devidos à ação sísmica segundo a direção do eixo xx E_{Edy} e são os esforços devidos à ação sísmica atuando na direção do eixo yy.

8.4.3 Dimensionamento em condições normais de temperatura

8.4.3.1 Lajes mistas

O dimensionamento foi realizado para a laje com os maiores esforços, tendo-se assumido a solução obtida para todo o edifício. Foram adotados os pavimentos do fabricante “O Feliz” que possui um catálogo de lajes mistas com chapa colaborante.

A laje mista que resultou do cálculo possui as características que se listam na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 – Propriedades mecânicas da laje mista H60 x 0,70 x 120

Mrd ⁺ [kN.m/m]	Vrd [kN/m]	Mrd ⁻ [kN.m/m]	EI [kN.m ² /m]	Peso Próprio [kN/m ²]
21.2	17.5	12.6	1261	2.18

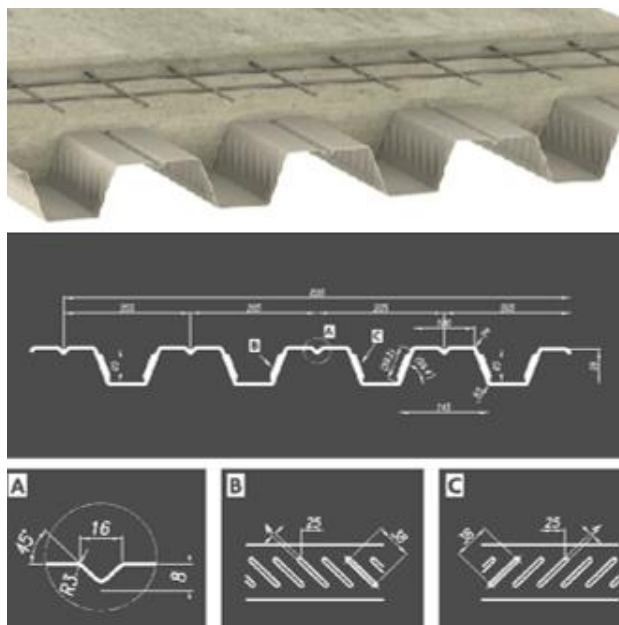


Figura 8.11 – Características geométricas da laje mista H60 x 0,70 x 120

8.4.3.2 Vigas mistas

O dimensionamento do perfil metálico das vigas mistas foi realizado com o programa ABC, assim como o diâmetro, altura e espaçamento dos conetores. Procedeu-se primeiro ao dimensionamento das vigas secundárias e posteriormente ao das vigas principais, para as situações de carga apresentadas na Figura 8.12. Relativamente ao processo construtivo considerou-se que as vigas seriam escoradas e que não possuiriam travamentos laterais. O programa ABC permite realizar a análise ao fogo, contudo não foi efetuada, por se pretender que fosse testada a aplicação desenvolvida *Fire Protection Analysis – Composite Beams*.

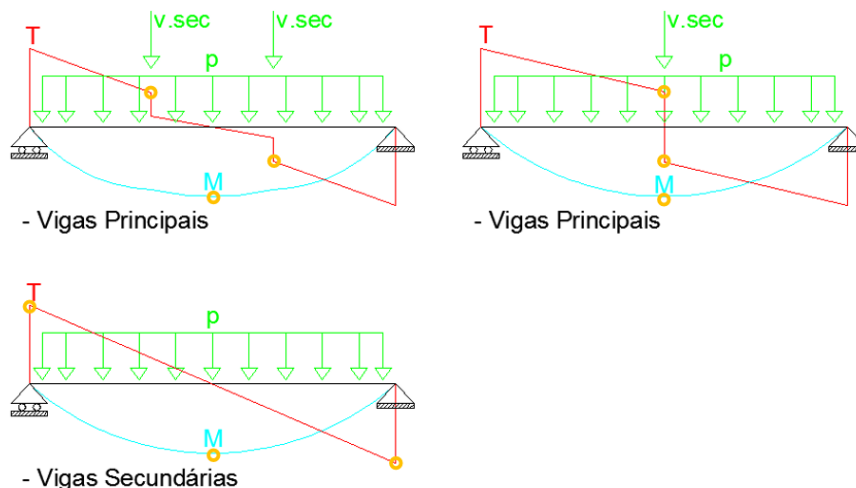


Figura 8.12 – Situações de carga a que as vigas secundárias e principais estão sujeitas

O programa ABC permite o dimensionamento de vigas com um mínimo de vão de 4 m. Atendendo a ser que algumas das vigas secundárias possuem apenas 3,5 m de comprimento, do cálculo resultou um sobredimensionamento dos perfis, que contudo não influencia o estudo que se pretendeu realizar.

Procurou-se obter os perfis mais económicos, sem atender numa primeira fase ao dimensionamento em situação de incêndio, uma vez que um dos objetivos consistiu em comparar as alterações resultantes dessa análise. Para isso sempre que o momento fletor foi o esforço condicionante, procurou-se atingir um grau de conexão próximo de 100%, de modo a rentabilizar ao máximo o desempenho conjunto do perfil metálico e da laje de betão.

Após a inserção de todos os dados da laje, do perfil, da conexão, das ações e combinação de ações no programa, é realizado o cálculo. Os perfis obtidos constam da Figura 8.13 para os pisos, e da Figura 8.14 para a cobertura, estando as vigas principais representadas com linhas pretas e as vigas secundárias com linhas vermelhas.

Foram adotados para a generalidade das vigas mistas conectores com 19 mm de diâmetro e 100 mm de altura, variando o espaçamento consoante o tipo de perfil utilizado.

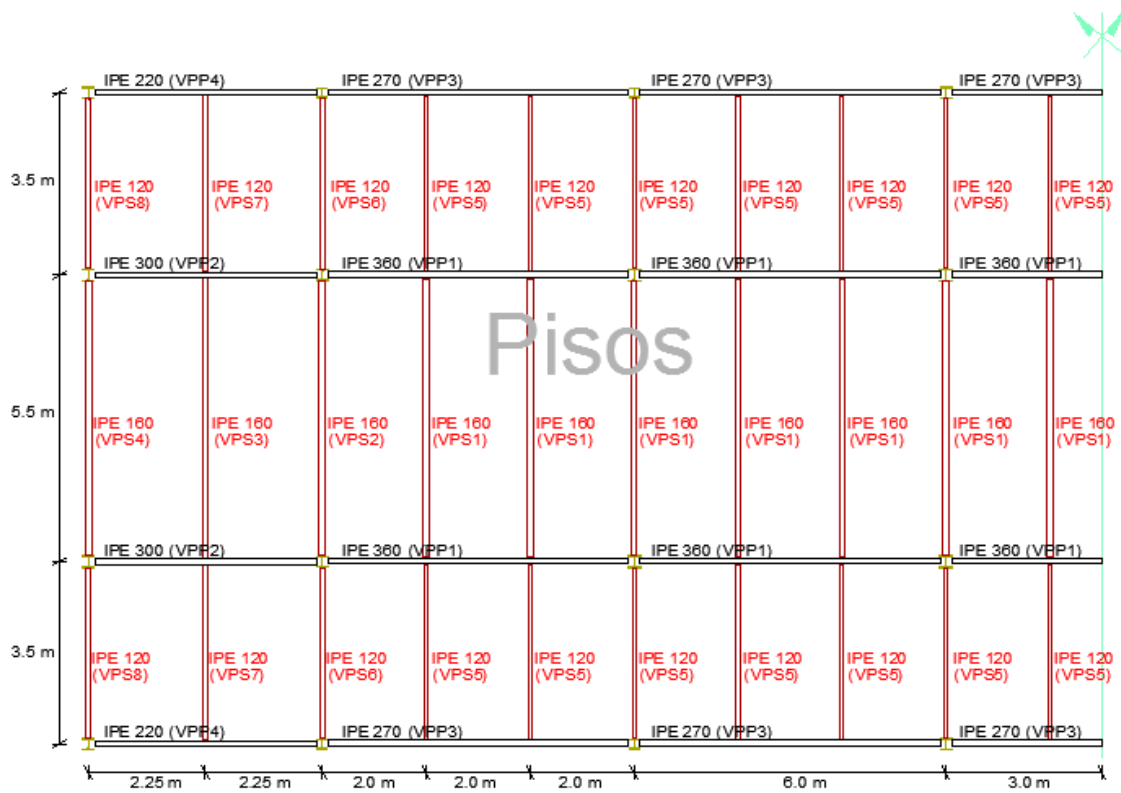


Figura 8.13 – Perfis das vigas mistas obtidos para os pisos



Figura 8.14 - Perfis das vigas mistas obtidos para a cobertura

Na Tabela 8.7 e na Tabela 8.8 estão discriminados os resultados relativos à conexão das vigas principais e secundárias dos pisos em condições normais de temperatura.

Tabela 8.7 – Resultados referentes à conexão das vigas principais dos pisos, em condições normais de temperatura

Grupo	Perfil	Força máxima no aço [kN]	Força máxima no betão [kN]	Resistência da conexão [kN]	Espaçamento dos conectores [mm]	Grau de conexão [%]
VPP1	IPE360	2000.1	1296.3	1299.6	100	100.2
VPP2	IPE300	1479.8	972.2	974.7	100	102.5
VPP3	IPE270	1263.5	717.3	866.4	105	120.8
VPP4	IPE220	917.7	550.9	476.5	200	86.5

Tabela 8.8 - Resultados referentes à conexão das vigas secundárias dos pisos, em condições normais de temperatura

Grupo	Perfil	Força máxima no aço [kN]	Força máxima no betão [kN]	Resistência da conexão [kN]	Espaçamento dos conectores [mm]	Grau de conexão [%]
VPS1	IPE160	552.5	1188.2	656.9	205	118.9
VPS5	IPE120	363.3	864.17	505.3	205	139.1
VPS8	IPE120	363.3	459.7	505.3	205	139.1

Na Tabela 8.9 e na Tabela 8.10 estão descritos os valores dos esforços atuantes mais relevantes e da capacidade resistente das vigas principais e secundárias dos pisos e cobertura em condições normais de temperatura, nomeadamente o momento fletor e o esforço transversal.

Tabela 8.9 – Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas principais dos pisos em condições normais de temperatura

Grupo	Perfil	Momento Fletor			Esforço Transverso		
		M_{ED} [kN.m]	M_{RD} [kN.m]	Rácio	V_{ED} [kN.m]	V_{RD} [kN.m]	Rácio
VPP1	IPE360	450.8	473.4	0.95	265.1	557.9	0.47
VPP2	IPE300	267.8	307.4	0.87	178.5	407.8	0.43
VPP3	IPE270	228.7	232.8	0.98	138.8	351.5	0.39
VPP4	IPE220	134.0	143.9	0.93	95.9	252.2	0.38

Tabela 8.10 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas secundárias dos pisos em condições normais de temperatura

Grupo	Perfil	Momento Fletor			Esforço Transverso		
		M_{ED} [KN.m]	M_{RD} [KN.m]	Rácio	V_{ED} [KN.m]	V_{RD} [KN.m]	Rácio
VPS1	IPE160	88.6	102.7	0.86	64.5	153.3	0.42
VPS5	IPE120	46.7	60.7	0.77	46.7	100.1	0.47
VPS8	IPE120	48.7	56.6	0.86	48.8	100.1	0.49

Verifica-se que o momento fletor é o esforço mais condicionante e que a interação do esforço transverso com o momento fletor é desprezável, devido aos valores relativamente baixos de corte.

Depois de obtidas as seções para as vigas foi necessário proceder à atualização do modelo no programa Revit, assim como adicionar a informação relativa aos conetores. No ARSA foi também necessário atualizar as seções, para que no cálculo das seções dos pilares e dos contraventamentos fossem consideradas as ações corretas.

8.4.3.3 Pilares e contraventamentos

As seções que verificam a segurança para os pilares e contraventamentos foram determinadas no ARSA. Os perfis foram separados por grupos com características iguais, em termos de propriedades geométricas, materiais e de condições de apoio e de carga, para efeitos de dimensionamento.

Na Figura 8.15 ilustra-se a caixa de diálogo do ARSA onde são introduzidos alguns dos parâmetros de cálculo para cada tipo de elemento.

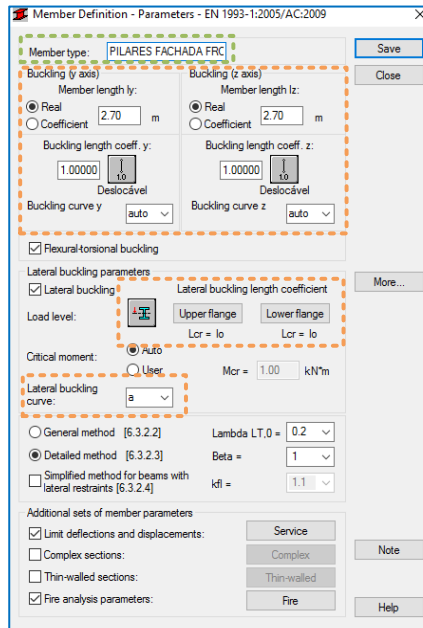


Figura 8.15 – Definição de parâmetros de cálculo para os perfis metálicos no ARSA

Na Figura 8.16 estão descritas as seções dos pilares resultantes do cálculo estrutural.



Figura 8.16 – Seções obtidas para os pilares

Do cálculo dos contraventamentos resultaram diversas seções bastante díspares, pelo que se optou por uniformizar os perfis a adotar, tendo-se selecionado as soluções apresentadas na Figura 8.17.



Figura 8.17 – Seções em perfis CHS obtidas para os contraventamentos

Todos os elementos foram classificados como possuindo secções de classe 1.

8.5 ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Na análise em situação de incêndio pretendeu-se estudar a proteção dos pilares, contraventamentos, e vigas mistas, com dois tipos de sistemas de proteção diferentes:

- a) Tinta intumescente Hempacore one 43600 da Hempel;
- b) Argamassa vermiculite cimento da Biofire.

Para esta análise foram utilizadas as duas ferramentas de projeto criadas, tendo sido também realizada uma análise económica, de forma a perceber a influência da proteção ao fogo, tanto a nível estrutural como a nível económico.

Para realizar a análise ao fogo foi necessário estabelecer em primeiro lugar qual o tempo de resistência ao fogo pretendida, de acordo com o estabelecido pelo Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios em edifícios. Verifica-se que para este tipo de estrutura, apenas com funções de suporte, o tempo mínimo de resistência contra o fogo requerido é de 60 minutos. No entanto, como na maioria dos projetos desenvolvidos pela SE2P, é requisitado que o tempo mínimo de resistência ao fogo seja de 90 minutos, adotou-se também este tempo para o caso em estudo.

8.5.1 Ações e combinação de ações em situação de incêndio

As ações consideradas no dimensionamento em situação de incêndio são as apresentadas na Tabela 8.11, diferindo do dimensionamento a temperatura normal, na exclusão da ação sísmica e da temperatura, e a inclusão da ação acidental fogo.

Tabela 8.11 – Ações consideradas no dimensionamento da estrutura em situação de incêndio

Categoria	Tipo de ação	Zonas de atuação	Norma
Restantes Cargas Permanentes (RCP)	Revestimentos	Distribuída pela área dos pisos e cobertura	EN 1991-1-1
	Paredes divisórias	Distribuída pela área dos pisos	RSA
Cargas Permanentes (G)	Peso próprio da laje	Toda a estrutura	EN 1991-1-1
	Peso próprio dos perfis	Toda a estrutura	
	Peso próprio das paredes de fachada	Distribuída pelas vigas perimetrais dos pisos	
	Peso próprio da platibanda	Distribuída pelas vigas perimetrais da cobertura	
Variável	Sobrecarga	Pisos e Cobertura	EN 1991-1-1
	Vento	Fachadas, cobertura e platibanda	EN 1991-1-4
Acidental	Fogo	Toda a estrutura	EN 1991-1-2

Relativamente às combinações de ações importa diferenciar as realizadas para o dimensionamento das vigas mistas e as calculadas para o dimensionamento dos pilares e contraventamentos.

Para as vigas mistas a determinação de esforços resultantes das combinações acidentais do fogo foi realizada com recurso ao Excel. As situações de carregamento a que as vigas estão sujeitas são semelhantes às apresentadas anteriormente em situação normal de temperatura, sendo que relativamente às vigas de piso tem-se a sobrecarga como única ação variável, e nas vigas de cobertura existe para além da sobrecarga a ação da pressão vertical exercida pelo vento.

As combinações de ações para os pilares e contraventamentos foram geradas no ARSA, tendo sido consideradas cinco combinações, uma com ação variável base a sobrecarga e quatro tendo como ação variável base o vento, conforme se pode verificar na Figura 8.18.

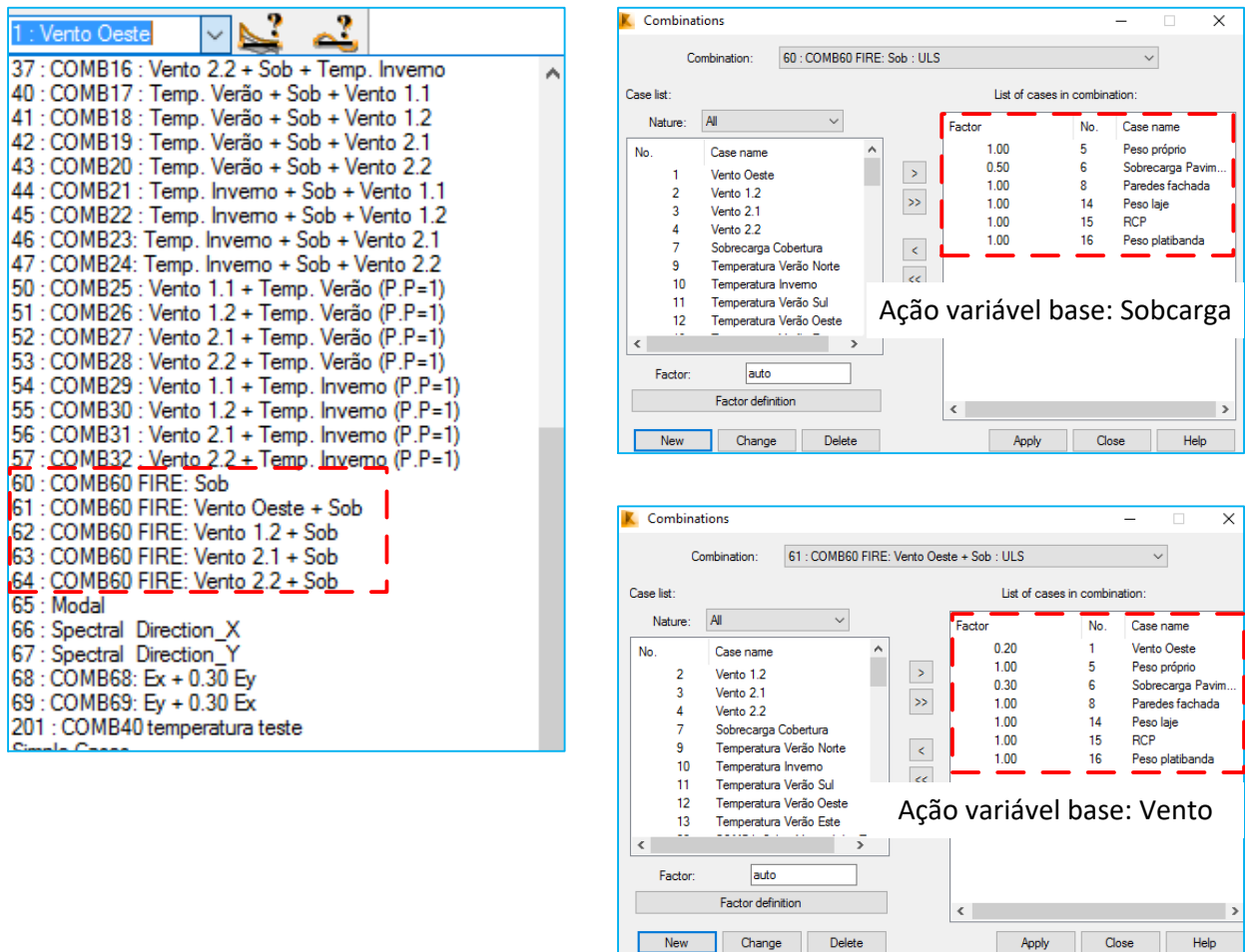


Figura 8.18 – Combinação de ações geradas no ARSA para dimensionamento dos pilares e contraventamentos

8.5.2 Determinação de proteções para as vigas mistas

De modo a realizar a análise da proteção necessária para cada tipo de viga mista foi necessário proceder previamente ao preenchimento do *FirePro-CompositeBeams*.

Após a completa inserção de informação relativa à análise ao fogo no Revit, foi necessário exportar os *schedules* relativos às lajes mistas e perfis metálicos para o *FirePro-CompositeBeams*, conforme ilustra a Figura 8.19.

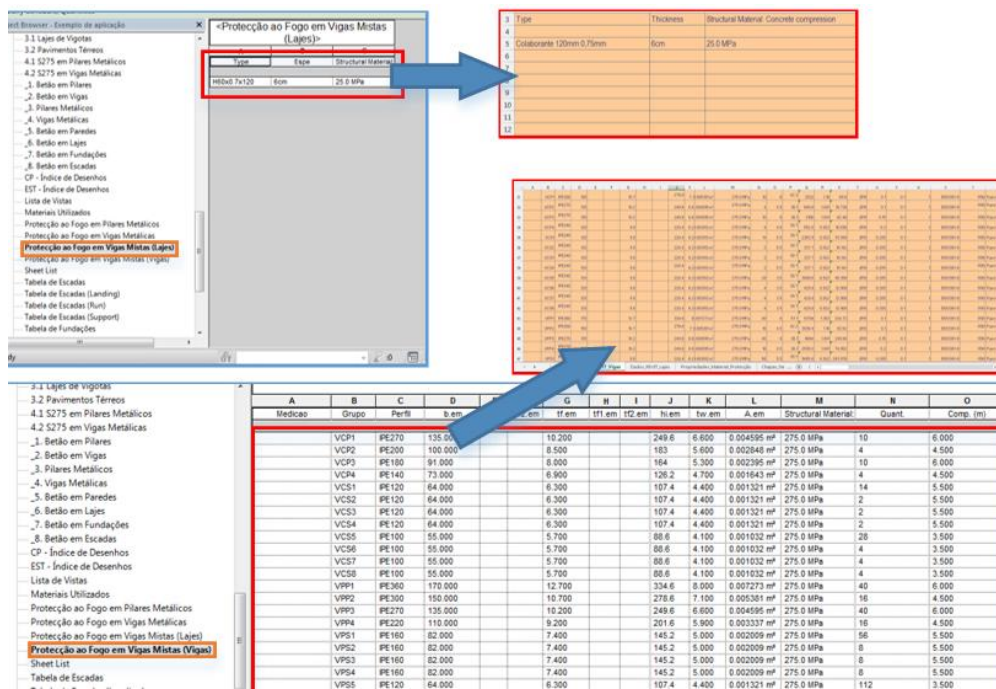


Figura 8.19 – Schedules do Revit exportados para o FirePro-CompositeBeams

Na área a verde da folha de Excel foram preenchidos os dados relativos ao tipo de laje, à chapa nervurada, à orientação da viga em relação às nervuras da laje (vigas principais são paralelas e as secundárias são perpendiculares), à largura efetiva das vigas mistas, e aos esforços atuantes.

Os esforços atuantes foram determinados para as situações de carga descritas na Figura 8.12, tendo sido consideradas como críticas as nas zonas de momento máximo com possível esforço transversal (meio vão), de esforço transversal máximo (apoios), e outras zonas onde ocorre interação do momento fletor com o esforço transversal.

Foram então determinados os esforços atuantes à temperatura ambiente com condições de análise ao fogo, apresentando-se os resultados na Tabela 8.12 e Tabela 8.13.

Tabela 8.12 - Resultados referentes à conexão das vigas principais dos pisos, à temperatura ambiente com condições de fogo

Grupo	Perfil	Força máxima no aço [KN]	Força máxima no betão [KN]	Resistência da conexão [KN]	Grau de conexão [%]
VPP1	IPE360	1923.6	1912.5	1306.5	68.3
VPP2	IPE300	1426.7	1434.4	958.1	67.2
VPP3	IPE270	1210.4	1058.3	871.0	82.3
VPP4	IPE220	883.7	813.5	479.1	58.9

Tabela 8.13 - Resultados referentes à conexão das vigas secundárias dos pisos, à temperatura ambiente com condições de fogo

Grupo	Perfil	Força máxima no aço [KN]	Força máxima no betão [KN]	Resistência da conexão [KN]	Grau de conexão [%]
VPS1	IPE160	533.4	1753.1	660.5	123.8
VPS5	IPE120	351.7	1275.0	406.5	115.6
VPS8	IPE120	351.7	678.3	406.5	115.6

Na Tabela 8.14 e na Tabela 8.15 estão descritos os valores dos esforços atuantes e da capacidade resistente das vigas principais e secundárias dos pisos e cobertura, respetivamente, à temperatura ambiente com condições de análise ao fogo.

Tabela 8.14 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas principais dos pisos à temperatura ambiente em condições de fogo

Grupo	Perfil	Momento Fletor			Esforço Transverso		
		M_{ED} [KN.m]	M_{RD} [KN.m]	Rácio	V_{ED} [KN.m]	V_{RD} [KN.m]	Rácio
VPP1	IPE360	450.8	473.4	0.95	265.1	557.9	0.47
VPP2	IPE300	267.8	307.4	0.87	178.5	407.8	0.43
VPP3	IPE270	228.7	232.8	0.98	138.8	351.5	0.39
VPP4	IPE220	134.0	143.9	0.93	95.9	252.2	0.38

Tabela 8.15 - Valores de esforços atuantes e resistentes das vigas secundárias dos pisos à temperatura ambiente em condições de fogo

Grupo	Perfil	Momento Fletor			Esforço Transverso		
		M_{ED} [KN.m]	M_{RD} [KN.m]	Rácio	V_{ED} [KN.m]	V_{RD} [KN.m]	Rácio
VPS1	IPE160	88.6	102.7	0.86	64.5	153.3	0.42
VPS5	IPE120	46.7	60.7	0.77	46.7	100.1	0.47
VPS8	IPE120	48.7	56.6	0.86	48.8	100.1	0.49

Procedeu-se ao cálculo das necessidades de proteção passiva com tinta intumescente e argamassa, sendo os resultados apresentados na Tabela 8.16. Foram realizadas iterações até ser possível determinar uma espessura de proteção para todos os perfis.

Tabela 8.16 – Necessidades de proteção passiva ao fogo para as vigas dos pisos (1ª iteração)

Grupo de Viga	Tipo de proteção	
	Tinta [mm]	Argamassa [mm]
VPP1	3.29	11
VPP2	3.64	11
VPP3	4.23	12
VPP4	×	13
VPS1	×	16
VPS2	×	16
VPS3	×	16
VPS4	×	16
VPS5	×	15
VPS6	×	15
VPS7	×	15
VPS8	×	15

Na 1ª iteração verifica-se que é possível encontrar sempre uma solução com argamassa para todas as vigas, uma vez que o cálculo é analítico, restando apenas verificar se as espessuras se encontram dentro de valores praticáveis, o que acontece neste caso.

Já no caso da adoção de tinta como sistema de proteção não é possível encontrar uma solução para a maior parte das vigas, uma vez que a determinação da espessura de proteção é realizada através da consulta de tabelas. Para perceber a razão deste facto torna-se útil e necessário consultar os relatórios que o *FirePro-CompositeBeams* elabora. Na Figura 8.20 é possível observar em pormenor o relatório respeitante a uma viga.

CALCULAR ESPESSURAS [mm]		VER RELATÓRIO Selecionar as linhas para as quais pretende	
0	Um ou mais elementos da secção do perfil com protecção insuficiente - VER RELATÓRIO	<input checked="" type="checkbox"/>	Linha5
0	Um ou mais elementos da secção do perfil com protecção insuficiente - VER RELATÓRIO	<input type="checkbox"/>	Linha6
0	Um ou mais elementos da secção do perfil com protecção insuficiente - VER RELATÓRIO	<input type="checkbox"/>	Linha7

Aquecimento do aço - [(4.3.4.2.2(3)) da EN 1994-1-2 :2011]		
Temperatura crítica do banzo superior: 522.846388547453°C	Factor de redução $K_y = 0.709176195502897$	Massivida
Temperatura crítica da alma: 595.765829458363°C	Factor de redução $K_y = 0.483125928679076$	Massividade: 303.030303030303 m ³
	Factor de redução do módulo de elasticidade $K_e = 0.3222$	
Temperatura crítica do banzo inferior: 522.846388547453°C	Factor de redução $K_y = 0.709176195502897$	Massivida

PROTECÇÃO AO FOGO - ESPESSURAS**	
Espeçura de protecção necessária para o banzo superior:	3.57149318359686 mm
Espeçura de protecção necessária para a alma:	0 mm
Espeçura de protecção necessária para o banzo inferior:	3.57149318359686 mm

Figura 8.20 – Pormenor do relatório de cálculo de uma viga

Verifica-se pela análise do relatório que não foi possível determinar espessura de protecção para a alma do perfil. Com base na sua temperatura critica e massividade a consulta das tabelas da tinta permite perceber a razão pela qual não foi possível encontrar uma solução, conforme documenta a Figura 8.21.

R90/4-sided						
Massividade\Temperatura	350	400	450	500	550	600
240				4.951	3.684	3.336
245					3.739	3.395
250					3.793	3.454
255					3.848	3.513
260					4.030	3.571
265					4.300	3.630
270					4.571	3.689
275					4.841	3.748
280					5.111	3.807
285						3.866
290						4.045
295						4.232
300						4.419
305						4.606
310						4.793

Figura 8.21 – Excerto da tabela da tinta Hempacore One

Como se pode verificar o programa não consegue realizar a interpolação por falta de espessuras de protecção para a relação massividade/temperatura em causa. Para esta temperatura crítica seria necessário o perfil ter uma massividade inferior a 280 m⁻¹. No entanto esta alteração não produz um

resultado linear, uma vez que ao se adotar um perfil com menor massividade a sua temperatura crítica irá também aumentar.

Pela consulta das massividades dos perfis e das tabelas da tinta verificou-se que o perfil mínimo necessário seria o IPE240, pelo que se alteraram as seções das vigas correspondentes.

Procedeu-se em seguida à atualização dos perfis no modelo Revit, nomeadamente no que toca às propriedades físicas e geométricas, assim como ao cálculo dos novos esforços devido à alteração do peso próprio do perfil. O cálculo no *FirePro-CompositeBeams* foi repetido tendo-se obtido os novos valores que se apresentam na Tabela 8.17.

Tabela 8.17 - Necessidades de proteção passiva ao fogo para as vigas dos pisos (2ª iteração)

Grupo de Viga	Tipo de proteção	
	Tinta [mm]	Argamassa [mm]
VPP1	3.29	11
VPP2	3.64	11
VPP3	4.23	12
VPP4	✘	11
VPS1	4.46	10
VPS2	4.60	10
VPS3	4.73	10
VPS4	4.72	10
VPS5	3.64	6
VPS6	3.64	6
VPS7	3.64	6
VPS8	3.64	6

Na 2ª iteração as alterações promovidas não foram suficientes para que todas as vigas obtivessem espessuras de proteção para a tinta, tendo as espessuras de proteção de argamassa diminuído consideravelmente. Para o caso da viga de solução mais exigente o procedimento anterior foi repetido, tendo-se verificado que para a massividade que o perfil apresenta seria necessário que a temperatura crítica fosse superior.

Para obter uma solução seria necessário alterar a seção do perfil ou o grau de conexão. Uma vez que o grau de conexão é superior a 100%, a resistência da seção mista não foi condicionada pela conexão mas antes pelo momento fletor, como de resto se verificou em todas as situações. Assim a solução passou novamente pela alteração da seção de viga, substituindo a secção do grupo de vigas VPP4 de IPE 240 para IPE 270, obtendo-se os valores finais constantes da Tabela 8.18.

8.5.3 Determinação de proteções para os pilares e contraventamentos

Para os pilares e contraventamentos foi necessário determinar as temperaturas críticas no ARSA, com recurso ao módulo específico que o programa possui utilizando as combinações de ações acidentais.

Estes elementos são sujeitos a fenómenos de encurvadura por esforço axial de compressão, ainda que os pilares tenham que também ser analisados à encurvadura lateral devido às ações horizontais do vento, que ainda assim são de pequeno valor.

Tendo em conta os fenómenos de instabilidade não é possível aplicar o cálculo no domínio da temperatura, tendo as temperaturas críticas sido obtidas pelo método da resistência. Como tal, para verificar a segurança dos perfis foi necessário adotar uma temperatura inicial e assim determinar a sua resistência e respetiva segurança. No cálculo iterativo optou-se por utilizar patamares de 50°C, procedendo-se à verificação da resistência dos perfis em cada patamar de temperatura.

Do cálculo dos perfis com as combinações acidentais de fogo resultou a verificação de segurança de todos os perfis com aumento dos rácios da capacidade resistente das seções, principalmente nos contraventamentos em termos de encurvadura por compressão. Verificou-se a alteração da classe de seção da maior parte dos perfis, mas em caso algum atingindo a classe 4, o que levaria a alterações na formulação de cálculo em situação de incêndio.

Em seguida foi utilizado o *FirePro-Steel* para a determinação das espessuras de proteção passiva nos pilares e contraventamentos, sendo os seus valores indicados na Tabela 8.19. Tal como para as vigas mistas, foram realizadas iterações até ser obtida uma solução de espessura de proteção para todos os perfis.

Tabela 8.19 – Necessidades de proteção passiva para os pilares e contraventamentos (1ª iteração)

Pilares	Tipo de proteção	
	Tinta [mm]	Argamassa [mm]
HEA180	3.53	13
HEA200	3.74	14
HEA220	3.57	13
HEA240	3.01	11
Contraventamentos		
CV1 - CHS 114.3x3	✘	13
CV2 - CHS 114.3x4	✘	14
CV3 - CHS 114.3x5	✘	10
CV4 - CHS 139.7x4	✘	9
CV5 - CHS 139.7x5	✘	9

Como seria de prever, na 1ª iteração foi possível determinar para os pilares espessuras para ambos os sistemas de proteção, uma vez que os perfis HEA possuem uma grande robustez.

Já para os contraventamentos não foi possível determinar qualquer espessura de tinta intumescente. O *FirePro-Steel* não dispõe de relatório mas fornece uma mensagem em que comunica esta ocorrência devida à massividade do perfil. Adotando procedimento idêntico às vigas mistas, verificou-se nas tabelas da tinta qual a massividade a partir da qual seria possível obter espessuras de proteção.

Através do incremento sequencial da seção dos contraventamentos, de forma a aumentar a inércia e a diminuir a massividade, foi possível obter as soluções que se apresentam na Tabela 8.20.

Tabela 8.20 – Necessidades de proteção passiva para os pilares e contraventamentos (2ª iteração)

Pilares	Tipo de proteção	
	Tinta [mm]	Argamassa [mm]
HEA180	3.53	13
HEA200	3.74	14
HEA220	3.57	13
HEA240	3.01	11
Contraventamentos		
CV1 - CHS 139.7x6.3	4.77	4
CV2 - CHS 139.7x8	4.77	6
CV3 - CHS 139.7x8	4.77	6
CV4 - CHS 139.7x8	4.39	5
CV5 - CHS 139.7x8	4.77	6

De referir que apesar da maior carga nos pilares resultantes do aumento do peso próprio dos contraventamentos, este incremento é pouco significativo e em nada altera as espessuras de proteção dos pilares, as seções obtidas para os contraventamentos constam da Figura 8.23.

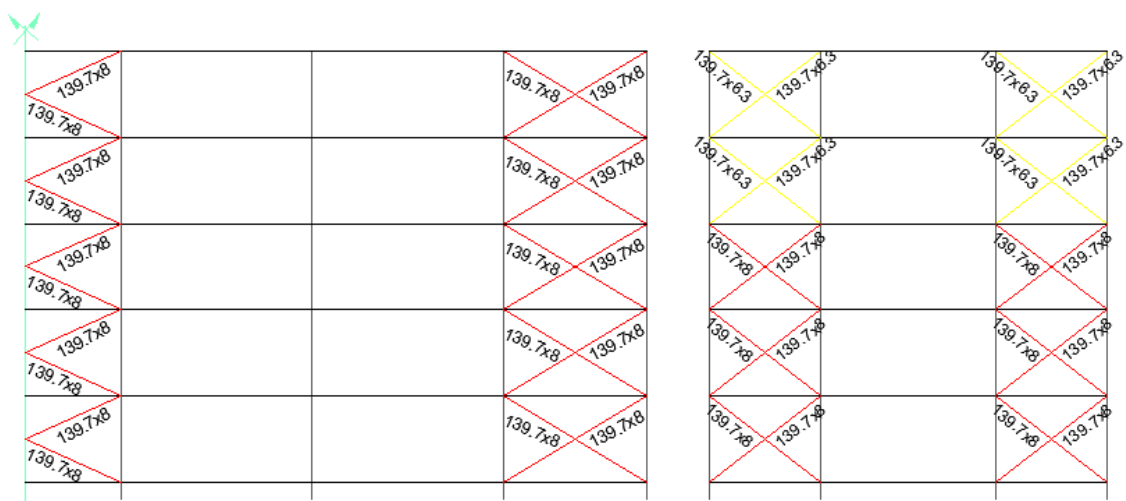


Figura 8.23 – Seções CHS obtidas para os contraventamentos

8.6 ANÁLISE ECONÓMICA

Com a análise económica pretendeu-se perceber o impacto que a proteção passiva ao fogo tem no custo de obra, assim como a comparação entre os dois tipos de proteção. Esta análise foi realizada no Revit, uma vez que já estão criados nos schedules as colunas a preencher com os preços unitários dos materiais, sendo devolvidos os valores totais correspondentes, respeitando-se assim os princípios BIM. No entanto, para efeito de apresentação de resultados no presente trabalho, foram produzidos gráficos onde são apresentadas as comparações.

Para a estimativa de custos utilizaram-se os preços unitários do aço e os custos de produção indicados na Tabela 8.21, bem como o custo da proteção anticorrosiva e da proteção ao fogo em tinta intumescente e argamassa, indicados na Tabela 8.22. Estes valores foram fornecidos pela SE2P, com base na experiência e contacto com empresas especializadas do ramo.

O custo do aço está diferenciado pelo tipo de perfil, tubular circular ou HEA, bem como pelo custo de transformação, transporte e montagem, no qual já está incluída uma percentagem que atende ao custo associado às ligações.

Tabela 8.21 – Custos unitários adotados para o aço em perfil e processos inerentes à produção

Tipo de secção	Aço S275J0 em perfil [€/kg]	Transformação, transporte e montagem [€/kg]
CHS	0.8	0.6
HEA	0.7	0.5

Tabela 8.22 – Custos unitários adotados para os sistemas de proteção tinta intumescente e argamassa

Tipo de secção	Apenas proteção anticorrosiva [€/m ²]	Intumescente e anticorrosiva [€/um/m ²]	Argamassa e tinta anticorrosiva [€/mm/m ²]	
CHS	11	0.03	1.15	se <11mm 12€/m ²
HEA	11	0.03	1.15	se <11mm 12€/m ²

A análise de custos com o Revit é uma tarefa facilitada, uma vez que o software possui os dados necessários para os cálculos, como a quantidade de cada perfil, comprimento, área de pintura, peso do perfil. Acresce a estes dados informação relativa à espessura de proteção e preços unitários.

Na Figura 8.24 é realizada a comparação entre os sistemas de proteção passiva por tinta e por argamassa. De referir que nas vigas mistas são consideradas as proteções determinadas na 3ª iteração e no caso dos contraventamentos e pilares na 2ª iteração (cenário I).

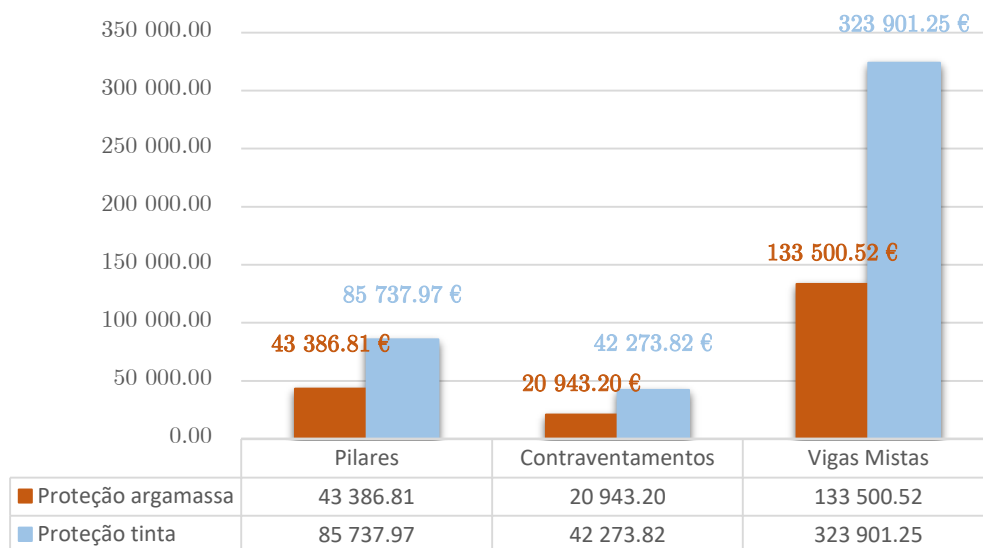


Figura 8.24 – Comparação de custos entre os sistemas de proteção tinta e argamassa (cenário I)

Na Figura 8.25 compara-se o cenário mais económico da proteção com argamassa, ou seja, utilizando sempre a 1ª iteração para a argamassa, sendo os valores da proteção de tinta iguais à anterior (cenário II).

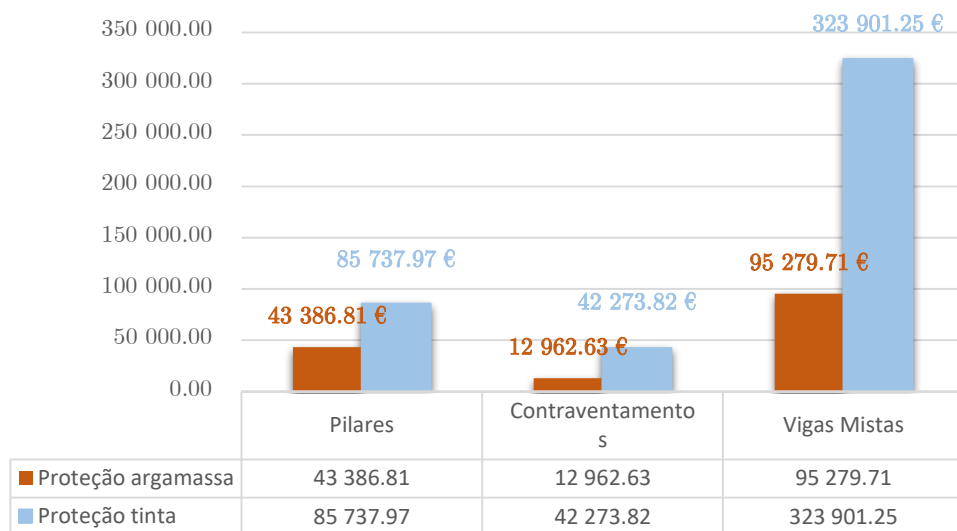


Figura 8.25 - Comparação de custos entre os sistemas de proteção tinta e argamassa (cenário II)

Verifica-se que a discrepância entre as proteções ainda se acentua mais, uma vez que com as iterações a espessura da argamassa aumenta mas o aumento de peso do aço acaba por ser mais determinante em termos de custos totais.

Realizou-se também a comparação entre o custo do aço sem proteção, com proteção por argamassa (na solução mais económica), e proteção por tinta intumescente. Traduzida pelo gráfico da Figura 8.26, onde é perceptível o impacto que tem nos custos a obrigatoriedade de proteção da estrutura ao fogo.

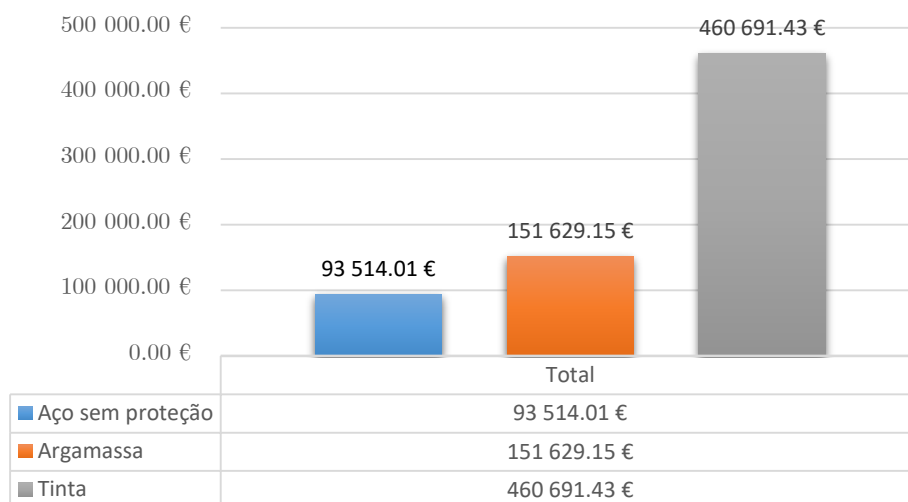


Figura 8.26 - Comparação de custos de estruturas sem proteção e dotado de sistemas de proteção com tinta e argamassa

9 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

9.1 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho abordou uma matéria que assume importância crescente no setor da construção civil, com a crescente consciencialização da sociedade atual para a segurança perante fenómenos de carácter accidental, como incêndios e sismos, elevando ainda mais a responsabilidade por parte do projetista. A entrada em vigor de metodologias europeias para o cálculo estrutural, criando bases de projeto organizadas e claras, permite ao projetista criar ferramentas e metodologias aceites por todos os intervenientes do setor da construção.

Os Eurocódigos fornecem dois métodos para a determinação da ação térmica, uma descrita como prescritiva e outra baseada no desempenho. Este segundo método é de aplicação bastante mais complexa do que o primeiro, mas uma vez que representa o desenvolvimento de um incêndio real, representando de forma mais fidedigna cada situação, pode permitir um dimensionamento mais preciso e otimizado. No entanto a complexidade da sua aplicação não se justifica para estruturas correntes, pelo que se adotou o método prescritivo, com recurso a curvas de incêndio nominais, que através de ensaios laboratoriais representam o comportamento de um incêndio real, podendo resultar em soluções bastante conservativas em construções de maior complexidade. O trabalho desenvolvido reflete a necessidade de possuir um método para a determinação de espessuras de proteção para estruturas metálicas e vigas mistas de estruturas correntes de forma célere e eficiente, utilizando as ferramentas criadas, que poderão a qualquer momento serem alvo de melhoramento e atualização para maior ajuste às necessidades do utilizador.

A aproximação do método aos princípios BIM foi conseguida com o concentrar da informação no repositório Revit, compatibilizando o mais possível a utilização deste programa com as ferramentas criadas. As ferramentas Fire Protection Analysis – Steel Elements e o Fire Protection Analysis – Composite Beams permitem o cálculo de proteções para vários elementos em simultâneo, apresentado comentários para direcionar o utilizador na compreensão dos problemas técnicos, ou apenas sugestões de otimização.

Como se pôde constatar pela análise económica realizada no caso de estudo, e também pela literatura estudada ao longo do trabalho, tomou-se consciência que o custo das proteções passivas dos perfis metálicos tem grande relevância no custo total da estrutura, pelo que o facto de se poder testar diferentes soluções de forma rápida é essencial para conseguir uma solução o mais otimizada possível. Relativamente aos materiais de proteção testados, verifica-se como esperado que a tinta é bastante mais

oneroso do que o uso de argamassa. Esta grande diferença no custo das duas soluções deve-se não só ao custo superior da proteção propriamente dita, mas também à necessidade de muitas vezes ser necessário aumentar a secção do perfil, de modo a diminuir a sua massividade e assim conseguir uma melhor solução de proteção para a relação temperatura/massividade. O aumento de secção leva a um aumento do peso do aço e normalmente também ao aumento da área de pintura, e apesar de isso conduzir a um aumento da temperatura crítica, leva invariavelmente a um aumento do custo.

9.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para realizar o cálculo analítico da espessura de proteção passiva com argamassa foram utilizados valores tabelados, uma vez que não se conseguiu junto das marcas de mercado obter as propriedades físicas dos produtos por eles comercializados. Apenas com essas propriedades é que seria possível conseguir uma espessura correta para um determinado material. Assim sendo, os cálculos realizados são válidos para produtos tabelados, podendo não corresponder exatamente aos materiais que cada empresa comercializa. Seria importante a incorporação destas propriedades na base de dados da ferramenta e assim melhorar a solução obtida.

Quanto à ferramenta *FirePro-Steel*, julga-se importante conseguir uma comunicação automática com o ARSA, obtendo-se pelo Excel as temperaturas críticas do modelo de cálculo e aumentando o leque de opções quanto à ação do fogo, programando-se as curvas paramétricas.

Quanto ao programa *FirePro-CompositeBeams*, constata-se que a determinação da classe da secção em situação de incêndio e o cálculo da resistência ao corte longitudinal na laje de betão seriam aspetos úteis a incorporar. Uma vez que o dimensionamento de vigas mistas em condições normais de temperatura é muitas vezes efetuado em folhas de cálculo, seria também desejável que essa componente de cálculo fosse introduzida no programa de acordo com os princípios da metodologia BIM adotados e realizando o cálculo em simultâneo para a totalidade dos elementos de uma obra.

BIBLIOGRAFIA

A

Anti chamas (2014) – *Proteção passiva contra o fogo em aço estrutural*. site:
(<http://antichasmatais.blogspot.pt/2014/06/protecao-passiva-contra-o-fogo-em-aco.html>)

B

BS EN 10025-1 (2004) - *Hot rolled products of structural steels. Part 1: General technical delivery conditions*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

C

Cabrita Neves, I. (1997) - *Técnicas de proteção dos elementos de construção contra o fogo*.

Apontamentos teóricos da disciplina de Segurança de Estruturas ao Fogo, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

Calado, Luis (2008) - *Os novos Eurocódigos estruturais*. Comunicação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Calado, Luis e Santos, João (2010) - *Estruturas Mistas de Aço e Betão*. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

E

EN 1990 (2008) - *Basis of structural design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1991-1-1 (2009) - *Eurocode 1- Actions on structures. Part 1-1: General actions- Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium-

EN 1991-1-2 (2009) - *Eurocode 1- Actions on structures. Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1991-1-4 (2005) - *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1993-1-1 (2009) - *Eurocode 3- Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1993-1-2 (2009) - *Eurocode 3- Design of steel structures. Part 1-2: General rules- structural fire design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1993-1-5 (2006) - *Eurocode 3- Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1994-1-1 (2009) - *Eurocode 4- Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1994-1-2 (2008) - *Eurocode 4- Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules-structural fire design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 1998-1 (2004) - *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

ENV 13381-4 (2002) - *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4: Applied protection to steel members*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

EN 13501-1 (2007) - *Fire test to building material- classification*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.

F

Pannoni, Fabio Domingos (2012) - *Proteção de Estruturas Metálicas Frente ao Fogo*

Fonseca, Elza e Villa Real, Paulo (1999) - *Finite element modelling of thermal-elastoplastic behaviour of hot-rolled steel profiles submitted to fire*. Métodos Numéricos Engenharia. SEMNI. Espanha.

Franssen, Jean-Marc e Vila Real, Paulo (2010) - *Fire design of steel structures*. 1st edition. ECCS- European Convention for Constructional Steel Work.

Pinto, Filipe (2009) - *Larguras efectivas e vigas mistas submetidas a diferentes tipos de carregamento*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal

G

Gavina, Rui Pedro Rodrigues Pinheiro (2013) – *Desenvolvimento de ferramentas BIM no âmbito do cálculo estrutural em situação de incêndio*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal

I

Inácio, Pedro Jorge Rita Ledo (2011) – *Evolução da temperatura ambiente em construções sujeitas ao fogo*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal

L

Lennon T., Moore D. B., Wang Y. C. e Bailey C. G. (2007) - *Designers' guide to EN 1991-1-2, EN 1992-1-2, EN1993-1-2 and EN1994-1-2*. Thomas Telford Publishing. London, United Kingdom.

O

Oswaldo (2009) – *Prevenção e combate a sinistros causados por incêndio*. site:
<http://bombeiroswaldo.blogspot.pt/2015/07/triangulo-do-fogo-tetraedro-do-fogo.html>

R

Ramalho Maria Alzira e Gonçalves Miguel (2011) - *Verificação da resistência ao fogo das estruturas de betão através da plataforma www*. 2º Forum Internacional de Gestão da Construção- GESCON 2011. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal.

S

SE2P (2006) – *Portfólio*. site: www.se2p.pt/web1/zp/tpl1/id1/portfolio/ficha.asp?P_cod_portfolio=177, consultado em Abril de 2013.

V

Vila Real, Paulo (2010) - *NP EN 1991-1-2. Eurocódigo 1: Acções em estruturas expostas ao fogo*. Seminário Eurocódigos estruturais- LNEC. Lisboa, Portugal.

Vila Real, Paulo (2011) - *Apontamentos teóricos da disciplina de Estruturas Metálicas II*, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal.