



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Nuno Miguel Cardoso Gonçalves

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS
EM AÇO EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS

Dissertação intitulada “Análise comparativa de soluções estruturais em aço em pavilhões industriais”, realizada no âmbito do Mestrado em Construção Metálica e Mista, sob a orientação, respetivamente, do Professor Doutor Rui A. D. Simões e do Doutor Hélder D. S. Craveiro e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Outubro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Nuno Miguel Cardoso Gonçalves

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS EM AÇO EM PAVILHÕES INDUSTRIAIS

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURAL STEEL IN INDUSTRIAL BUILDINGS

Dissertação de Mestrado em Construção Metálica e Mista
orientada pelo Professor Doutor Rui A. D. Simões e pelo Doutor Hélder D. S. Craveiro

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Outubro de 2021

1 2  9 0

UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Rui Simões e coorientador Doutor Hélder Craveiro, pela orientação, pelos conhecimentos transmitidos, pelas opiniões e críticas, total colaboração no solucionar de dúvidas que foram surgindo ao longo da tese e pela total disponibilidade relativamente a correções e sugestões relevantes para esta dissertação.

Quero agradecer família e amigos, por serem encorajadores, pelo seu apoio incondicional, incentivo, amizade, paciência demonstrada e total ajuda na superação dos obstáculos que foram surgindo nesta caminhada.

Quero agradecer à Fametal – Fábrica Portuguesa de Estruturas Metálicas, S.A. pela oportunidade que me foi concedida, e pelo companheirismo que caracteriza os elementos desta empresa, contribuindo de forma decisiva para a conclusão deste curso com sucesso.

Um Muito Obrigado a todos.

Esta dissertação teve ainda o apoio de fundos nacionais pelo Programa Centro 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), no âmbito do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento pelo Projeto Switch2Steel – Plataforma de cálculo e otimização do custo de pavilhões industriais e comerciais construídos com estruturas metálicas, com a referência CENTRO-01-0247-FEDER-047136 e o Projeto *INTERFACESEGURA – Segurança e resiliência ao fogo das zonas de interface urbana-florestal*, financiado por fundos nacionais através da FCT.

RESUMO

Na construção de pavilhões industriais, as estruturas metálicas têm vindo a perder competitividade em relação às estruturas em betão armado (pré-fabricado), principalmente, devido à regulamentação prescritiva de segurança contra incêndios (ISO 834) que muitas vezes é adotada, que tem penalizado sistematicamente as soluções em aço. A abordagem com base no desempenho (utilizando o *OZone 3* com modelos até duas zonas) recorrendo a modelos de incêndios naturais, tendo em conta várias características do edifício em análise, pode conduzir a soluções mais otimizadas. Uma outra forma de aumentar a competitividade das estruturas em aço, passa por otimizar a proteção passiva, nomeadamente a espessura de tinta intumescente (que representa um peso significativo no custo total da estrutura metálica), sendo feito um balanço entre otimização estrutural (peso) e otimização dessa espessura. Ou seja, se economicamente é mais benéfico ter uma secção mais esbelta, com menos peso mas com maior necessidade de proteção passiva, ou, se por outro lado, uma secção mais pesada mas com menor necessidade de proteção passiva. Nesta dissertação será feito um estudo comparativo entre soluções metálicas (com base na aplicação em pavilhões industriais) considerando diferentes classes de aço, nomeadamente S275, S355 e S460. Por outras palavras, se compensa ter uma estrutura globalmente mais pesada em aço da classe S275, cujo custo unitário é menor, contrapondo com uma solução em aço da classe S355 ou em aço de alta resistência S460, que será mais leve, mas que terá um custo unitário superior. Esta análise irá ter em conta o comportamento estrutural do edifício, contemplando vários parâmetros do dimensionamento como, a deformação, encurvadura, entre outros, em que a mudança de classe de aço poderá já não trazer grandes benefícios no desempenho global da estrutura. Por último, será feita uma avaliação da sustentabilidade da solução em aço comparativamente com a solução em betão, através duma análise de ciclo de vida das soluções estruturais analisadas, já que este requisito será cada vez mais um fator diferenciador na seleção das soluções estruturais, respondendo aos desafios lançados no pacto ecológico europeu.

Estas temáticas serão abordadas em grande parte num ambiente empresarial, usando uma abordagem baseada num caso de estudo, dando importância capital ao fator económico das soluções encontradas, baseada na análise de um pavilhão industrial.

Palavras-chave: pavilhões industriais, análise ao fogo, análise com base no desempenho, proteção passiva, tinta intumescente, classes do aço, sustentabilidade, custos por kg.

ABSTRACT

In the construction of industrial buildings, steel structures have been losing competitiveness comparing to reinforced concrete structures (precast), mainly, due to the prescriptive fire safety regulation (ISO 834) that is often adopted, which has systematically penalized steel solutions. The performance-based approach (using *OZone 3* with models up to two zones), with models of natural fires, taking into account various characteristics of the building under analysis, may lead to more optimized solutions. Another way to increase the competitiveness of steel structures is to optimize passive protection, particularly the thickness of intumescent paint (which represents a significant weight in the total cost of the metal structure), with a balance being made between structural optimization (weight) and paint thickness optimization. This means, if economically it is more beneficial to have a slender section, with less weight but greater need for passive protection, or, if on the other hand, a heavier section but less need for passive protection. In this thesis a comparative study will also be made between metal solutions (based on application in industrial buildings) considering different grades of steel, namely S275, S355 and S460. In other words, it pays to have an overall heavier structure in grade S275 steel, whose cost per kg is lower, as opposed to a solution in grade S355 steel or high-resistance steel S460, which will be lighter but will have a higher cost per kg. This analysis will take into account the structural behaviour of the building, contemplating several design parameters such as deformation, buckling, among others, in which the change of steel grades may no longer bring great benefits to the overall performance of the structure. Finally, the sustainability of the steel solution will be assessed, through a life cycle analysis of the structural solutions, as this requirement will increasingly be a differentiating factor in the selection of the structural solutions, responding to the challenges launched in the European ecological pact.

These themes will be addressed mostly in a business environment, using an approach based on a case study, giving capital importance to the economic factor of the solutions found, based on analysis of an industrial building.

Keywords: industrial buildings, fire analysis; performance-based analysis, passive protection, intumescent paint, grades of steel, sustainability, costs per kg.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	i
ABSTRACT	2
ÍNDICE.....	iii
SIMBOLOGIA	vi
ABREVIATURAS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Considerações gerais sobre o aço	9
1.1.1 O aço como material.....	9
1.1.2 Produção do aço	10
1.1.3 Sustentabilidade do aço	11
1.1.4 Construção em aço em Portugal	12
1.1.5 Prós e contras do aço	14
1.1.6 Conceção de uma estrutura em aço	15
1.2 Considerações gerais sobre o betão	16
1.2.1 O betão como material.....	16
1.2.2 Construção em betão armado em Portugal	16
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Estrutura da tese.....	18
2 PROJETO DE PAVILHÕES INDUSTRIAIS	19
2.1 Custos da estrutura metálica	19
2.1.1 O custo numa fase inicial do projeto	19
2.1.2 Fatores a ter em conta num estudo inicial de custos.....	20
2.1.3 Custos associados à construção metálica	21
2.2 Princípios de dimensionamento	22
2.2.1 Regulamentação.....	22
2.2.2 Conceção de um pavilhão industrial.....	23
2.2.3 Dimensionamento de acordo com os Eurocódigos.....	25
2.2.3.1 Quantificação de ações.....	25
2.2.3.2 Combinação das ações	26
2.2.3.3 Verificação de segurança – Estados Limites Últimos (ULS).....	27
2.2.3.4 Verificação de Segurança - Estados Limites de Utilização (SLS).....	27

2.2.3.5	Classe de Execução	28
2.3	Tipos de aço	28
2.3.1	Considerações gerais	28
2.3.2	Utilização de aço no mercado português	30
2.3.3	Precauções a ter na escolha do tipo de aço	31
2.4	Dimensionamento ao fogo	33
2.4.1	Considerações gerais	33
2.4.2	Imposições regulamentares.....	34
2.4.3	Metodologia de cálculo	39
2.4.3.1	Combinação da ação em situação de incêndio	39
2.4.3.2	Incêndio natural.....	41
2.4.3.3	Curvas apresentadas pela EN 1991-1-2	42
2.4.3.4	Densidade de carga de incêndio	46
2.4.3.5	Propriedades térmicas e mecânicas do aço	49
2.4.3.6	Fator de massividade.....	50
2.4.3.7	Proteção passiva	51
2.4.3.8	Dimensionamento pela EN 1993-1-2.....	53
2.4.3.9	Temperatura crítica	54
2.5	Sustentabilidade de um pavilhão metálico.....	55
3	CASO DE ESTUDO	58
3.1	Apresentação da solução em betão	58
3.2	Conceção da alternativa em aço.....	59
3.3	Materiais	61
3.4	Quantificação de Ações	61
3.4.1	Ações Permanentes.....	61
3.4.2	Ações Variáveis	62
3.4.2.1	Sobrecargas	62
3.4.2.2	Neve	63
3.4.2.3	Vento	64
3.4.2.4	Temperatura	66
3.4.3	Fogo.....	66
3.4.3.1	Requisito ao fogo de acordo com a legislação portuguesa.....	66
3.4.3.2	Ação em estruturas expostas ao fogo	69
3.4.4	Imperfeições	74
3.4.5	Resumo das Cargas Consideradas	75
3.5	Combinações de Ações	75
3.6	Análise e Resultados	76
3.6.1	Análise de Segunda Ordem	76
3.6.2	Verificações de Segurança de Elementos Metálicos	76

3.6.2.1	Dimensionamento à temperatura ambiente	77
3.6.2.2	Dimensionamento ao fogo	84
3.6.2.3	Fundações.....	91
3.7	Custos.....	92
3.8	Análise de ciclo de vida	96
4	CONCLUSÕES	99
	ANEXOS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

SIMBOLOGIA

b	coeficiente relativo às curvas paramétricas de incêndio; largura
c	calor específico
c_{dir}	coeficiente de direção
c_{season}	coeficiente de sazão
f_y	tensão de cedência
h	altura do edifício
h_{eq}	média ponderada das alturas de todas as aberturas verticais
k_I	coeficiente de turbulência
m	fator de combustão
$q_{t,d}$	valor de cálculo da densidade carga de incêndio referida à área A_t
$q_{f,k}$	densidade carga de incendio caraterística
$q_p(z)$	pressão dinâmica de pico a uma dada altura
q_{vi}	densidade de carga de incêndio por unidade de volume relativa à zona de armazenamento
t	tempo
t_{lim}	tempo limite
t_{max}	temperatura máxima da curva
t_{max}^*	tempo máximo
$v_{b,0}$	valor básico de referência da velocidade do vento
v_b	valor de referência da velocidade do vento
$v_m(z)$	velocidade média do vento a uma dada altura
z_0	comprimento de rugosidade
A_d	ações indiretas devido à situação acidental
A_t	área total da superfície envolvente
C_e	coeficiente de topografia
C_i	coeficiente adimensional de combustibilidade
C_t	coeficiente do fluxo térmico na cobertura
C_z	coeficiente zonal
E_d	valor de cálculo do efeito das ações
$E_{fi,d}$	valor de cálculo do efeito das ações em situação de incêndio
$G_{k,j}$	valor característico da ação permanente j

L	vão da viga; comprimento do edifício
M_{cr}	momento crítico
O	fator de abertura
P	valor representativo de uma ação de pré-esforço
R_{ai}	coeficiente adimensional de ativação do constituinte combustível armazenado
R_d	valor de cálculo da resistência correspondente
$R_{fi,d,0}$	valor de cálculo da resistência correspondente também em situação de incêndio para o tempo
$R_{fi,d,t}$	valor de cálculo da resistência correspondente também em situação de incêndio
T	temperaturas médias
T_0	temperatura inicial
α_{cr}	fator de carga
δ_{q1}	fator parcial para ter em conta o risco de ativação de incêndio em função da dimensão do compartimento
δ_{q2}	fator parcial para ter em conta o risco de ativação de incêndio função do tipo de ocupação
δ_n	conjunto de fatores em função das medidas ativas de proteção
ϕ	imperfeição global do pórtico
$\gamma_{G,j}$	coeficiente parcial relativo à ação permanente j
$\gamma_{Q,1}$	coeficiente parcial relativo à ação variável 1
$\gamma_{Q,i}$	coeficiente parcial relativo à ação variável i
γ_P	coeficiente parcial relativo a ações de pré-esforço
η_{fi}	redução de carga relativamente à situação de carregamento para a temperatura ambiente
λ	condutibilidade térmica
μ_0	grau de utilização
μ_1	coeficiente de forma para a carga da neve
ρ	massa volúmica
$\theta_{a,cr}$	temperatura crítica
θ_g	temperatura do gás no compartimento
$\theta_{máx}$	temperatura máxima
$\psi_{0,i}$	coeficiente para a determinação do valor de combinação da ação variável i
$\psi_{1,1}$	coeficiente frequente para combinação de ações
$\psi_{2,1}$	coeficiente quase permanente para combinação de ações
ΔT_u	temperatura uniforme

ABREVIATURAS

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ASAE – Autoridade de Segurança Alimentar e Económica

BIM – *Building Information Modeling*

CC – Classe de Consequência

CFD – *Computacional Fluid Dynamics*

DCH – Classe de Ductilidade Alta

DCL – Classe de Ductilidade Baixa

DCM – Classe de Ductilidade Média

PIR – Poliisocianurato

PUR – Poliuretano

RC – Classe de Fiabilidade

REI – Resistência, Estanquidade e Isolamento

RHR_f – Taxa máxima de libertação de calor por m²

RJ-SCIE – Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios

SLS – Estados Limites de Utilização

ULS – Estados Limites Últimos

WSA – *World Steel Association*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais sobre o aço

1.1.1 O aço como material

O aço é uma liga que resulta da combinação do ferro com o carbono (menos de 2%), juntamente com algum aço reciclado e pequenas quantidades de outros elementos resultantes de impurezas do próprio processo de fabrico, tais como, o manganésio, a sílica, o fósforo, enxofre e o oxigénio. Daqui resulta um material muito resistente mecanicamente, mais dúctil e com uma soldabilidade melhorada, quando comparado com o ferro fundido (com quantidades de carbono mais elevadas). O aço consegue ser 1000 vezes mais forte que o ferro, sendo por isso um material que veio revolucionar vários ramos da indústria quando surgiu.

O aço é o material mais relevante na construção civil, bem como em outras atividades. Está presente na nossa vida quotidiana nas mais variadas formas, como por exemplo nos carros, em eletrodomésticos, etc. Mas quando se fala em aços na construção, fala-se de aços carbono, essencialmente. Esses aços, que correspondem à maior parte das aplicações, podem ser designados de liga forte ou de liga fraca, consoante a sua composição química, ou seja, se tem mais ou menos de 5% de elementos de ferro e carbono. A soldabilidade dos aços de liga fraca é bastante melhor que dos de liga forte (tal como os aços inoxidáveis), pelo que deve ser um fator a considerar aquando da conceção da estrutura, uma vez que pode encarecer bastante a solução. Do ponto de vista de resistência à corrosão, também há algumas diferenças que se podem estabelecer entre aços. Alguns aços, que por adições de elementos de liga adquirem uma resistência intrínseca à corrosão, tal como acontece nos aços inoxidáveis, com a adição de cromo e níquel e nos aços da EN 10025-5 (CEN, 2004), como o aço patinável (*corten*), com a adição de fósforo e cobre. Todos os outros aços necessitam de uma proteção adicional, como por exemplo o tratamento por galvanização, termolacagem, ou a pintura, que continua a ser o método mais comum para garantir a durabilidade e resistência / proteção à corrosão das peças em aço.

Na construção metálica, o mais habitual é encontrar aços carbono laminados a quente (EN 10025-2 (CEN, 2004)), que também são designados por aços macios (ou aços de construção), porque têm baixo teor de carbono na sua constituição química (na ordem dos 0,2%).

1.1.2 Produção do aço

A produção do aço pode ser realizada de duas formas: em alto-forno de oxigénio ou por forno de arco-elétrico. Estes dois métodos distinguem-se essencialmente pelas matérias-primas que são consumidas, como é demonstrado no Quadro 1-1. Enquanto a produção de alto-forno consome minério de ferro, carvão e algum aço reciclado (sucata) até 30%, já o forno de arco-elétrico pode usar apenas aço reciclado e energia elétrica.

Quadro 1-1 – Produção de 1 kg de aço, em média, (WSA, 2019)

Produção de 1 kg de aço	Alto-forno	Forno de arco-elétrico
Minério de ferro [kg]	1,370	0,586
Carvão [kg]	0,780	0,150
Calcário [kg]	0,270	0,088
Sucata de aço [kg]	0,125	0,710
Eletricidade [MJ]	Pouco relevante	2,3

Em termos percentuais, atualmente, 70,7% do aço produzido mundialmente, provém do alto-forno. Depois de produzido, o aço pode ainda ter alguns tratamentos para lhe conferir propriedades diferentes, nomeadamente, tratamentos térmicos e mecânicos. Por último, é entregue em perfis, chapas, bobines, barras, etc.

Os produtos em aço, nas suas mais variadas funções, habitualmente têm uma longevidade muito grande, sendo usados durante décadas. No final da sua vida útil, podem ser reciclados e assim dar origem a novos produtos em aço. No entanto, o ritmo de reciclagem ainda é inferior ao ritmo de procura, por isso a produção ainda recorre muito ao aço produzido em alto-forno.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidas inúmeras tipologias de aço, estimando-se que existam mais de 3500 tipos diferentes, com diferentes características físicas, químicas e ambientais, sendo que 75% destes foram criados nos últimos 20 anos. Com esta evolução do material, por exemplo, a Torre Eiffel poderia ser reconstruída hoje com um terço do peso em aço, do que foi feito na época, em ferro (WSA, 2021).

Para enquadrar a produção de aço no mundo, em 2019, esse número atingiu as 1869 milhões de toneladas (1869000000000 kg). Mas tal como todas as indústrias, a indústria do aço, terá pela frente nos próximos 50 anos, essencialmente, 3 grandes desafios: em primeiro lugar, a indústria deste setor terá de encontrar formas do aço ser mais eficiente, porque a sua produção tenderá a estabilizar a longo-prazo, mas a procura presume-se que irá continuar em crescendo; em segundo, os desafios relativos à digitalização e tecnologia, com um grau de crescimento

exponencial nos últimos anos, as indústrias irão ter de se adaptar e envolver, num contexto de economia circular; por último, e talvez o mais importante, consiste na demonstração inequívoca de que o aço é um produto ecológico, ambientalmente competitivo, numa sociedade que cada vez mais alerta para a problemática da necessidade de reduzir as emissões de CO₂. A nível mundial, a China lidera a produção mundial por larga margem, conforme a Figura 1-1:

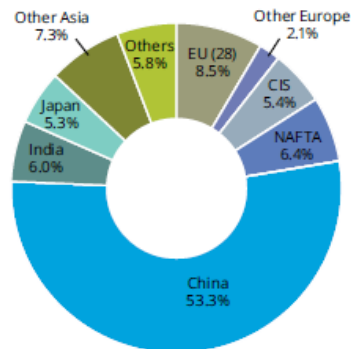


Figura 1-1 – Produção de aço bruto mundialmente em 2019, (WSA, 2020)

1.1.3 Sustentabilidade do aço

O aço é um material sustentável porque é 100% reciclável, além de poder ter uma grande durabilidade e também porque requer pouca energia na sua produção, quando comparado com outros materiais (ainda que seja um processo de uso intensivo de energia). Com o avanço da tecnologia do aço, é possível atualmente produzir aços com uma massa volúmica mais baixa, usados na indústria automóvel e na construção, que permitem otimizar a utilização do aço. Esse avanço, também tem permitido à indústria limitar cada vez mais as emissões poluentes, indo ao encontro às diretivas ambientais internacionais. Para se ter uma ideia dos progressos feitos nos últimos anos, retira-se que para a produção de uma tonelada de aço atualmente, requer menos de 40% de energia daquela que era necessária em 1960. A indústria de produção do aço continua a apostar na inovação, sendo que globalmente 7% das receitas são investidas em projetos de investigação de novos aços e em melhoria do processo de produção.

O aço é um material que pode ser reciclado de forma muito fácil, começando logo pela sua recolha, que devido às suas propriedades magnéticas permite uma fácil triagem entre os resíduos. A reciclagem do aço não está limitada a um tipo ou classe, porque todos podem ser reciclados, mantendo as propriedades que lhes são inerentes, não perdendo qualidades no processo de reciclagem, podendo ser reciclado infinitas vezes. Isto significa que a reciclagem do aço mantém ou pode aumentar as suas qualidades, dependendo dos processos metalúrgicos a que é submetido, ao contrário do que acontece com os outros materiais de construção, como

por exemplo, o betão, a madeira, etc., em que a reciclagem degrada a qualidade do material resultante, limitando assim o número de ciclos de vida que aquele material poderá ter.

Relativamente a emissões poluentes, atualmente, por cada tonelada produzida de aço, são emitidos em média 1,83 toneladas de CO₂, resultantes essencialmente da produção em alto-forno. Estima-se que este setor é responsável por 7% das emissões de CO₂ antropogénicas a nível global. Contudo, esta é uma preocupação do setor, estando em andamento diversas iniciativas conjuntas, de forma a reduzir as emissões em mais 50%, revolucionando a forma de produzir aço.

A durabilidade bastante elevada, com um ciclo de vida muito longo, também contribui significativamente para a sustentabilidade das estruturas em aço. Esta longevidade pode ser atingida com o recurso a pintura, metalização ou galvanização do aço, de forma a prevenir a corrosão natural do aço, ou então, pela utilização de aços já com propriedades intrínsecas no combate à corrosão, tal como acontece com os aços inoxidáveis ou os aços patináveis (como o aço *corten*).

1.1.4 Construção em aço em Portugal

A construção em aço tem vindo a consolidar-se no mercado português, demonstrando ser cada vez mais um material competitivo, sendo bastante expressiva a sua utilização em várias tipologias de edifícios, tais como: edifícios industriais, coberturas de grande vão (em estádios, por exemplo), na construção naval, pontes, e mais recentemente as torres eólicas. Noutras tipologias, como por exemplo, edifícios de vários pisos, escritórios ou espaços comerciais, o aço é cada vez mais utilizado em conjunto com o betão, aproveitando a relação simbiótica entre os dois materiais, para formar estruturas mistas.

Em Portugal, onde a construção tradicional em betão continua bastante enraizada, esse aumento de competitividade do aço está diretamente ligado ao menor peso da mão-de-obra no custo final de uma obra (por se tratar de um processo construtivo mais industrializado) e o menor impacto ambiental, quando comparado com a construção em betão. De forma mais transversal a todo o globo, o aparecimento de *softwares* mais expeditos, mas mais rigorosos, no dimensionamento de estruturas metálicas, assim como a introdução da tecnologia BIM veio trazer grandes benefícios à indústria do aço, uma vez que facilita e otimiza o processo de pré-fabricação. Da mesma forma, a qualidade da produção aumentou, em especial com a obrigatoriedade legal da aplicação da EN 1090 (CEN, 2018) a partir de 2015. Toda a digitalização da indústria beneficia os processos de fábrica, melhorando a eficiência de todas as etapas. Por isso, as indústrias metalomecânicas de produção de estruturas metálicas em Portugal, foram “obrigadas” a acompanhar todas estas evoluções, e a internacionalizarem-se, dependendo em grande parte do

mercado internacional para garantir a sustentabilidade do seu negócio; algumas já estão num patamar tão elevado internacionalmente, que podem produzir qualquer tipo de obra, para qualquer lugar do mundo.

Em 2018, o setor da construção metálica equivale a 1,6 mil milhões de euros de faturação, representando 2,1% das exportações do país. Sobre o emprego, este setor abrange 29000 postos de trabalho.(Lusa, 2019)

Quanto à produção do aço bruto e à sua utilização (aparente), Portugal apresenta valores muito baixos, quando comparados com os outros países da União Europeia, e residual se for comparado com a produção mundial, como é perceptível no Quadro 1-2 e no Quadro 1-3. No entanto, em valores absolutos tem apresentado aumentos ao longo dos anos nas duas vertentes.

Quadro 1-2 – Panorama internacional da produção de aço bruto (em toneladas)(WSA, 2019)

Total Production of Crude Steel										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Austria	5 662	7 206	7 474	7 421	7 953	7 876	7 687	7 438	8 135	6 885
Belgium	5 635	7 973	8 026	7 301	7 127	7 331	7 257	7 687	7 842	7 980
Bulgaria	726	737	835	633	523	612	543	527	652	666
Croatia	43	95	96	1	135	167	122	0	0	136
Czech Republic	4 594	5 180	5 583	5 072	5 171	5 360	5 262	5 305	4 550	4 938
Germany	32 670	43 830	44 284	42 661	42 645	42 943	42 676	42 080	43 297	42 435
Finland	3 066	4 029	3 989	3 759	3 517	3 807	3 988	4 101	4 003	4 146
France	12 840	15 414	15 780	15 609	15 685	16 143	14 984	14 413	15 505	15 387
Greece	2 000	1 821	1 934	1 247	1 030	1 022	910	1 158	1 359	1 467
Hungary	1 403	1 678	1 746	1 542	883	1 152	1 675	1 274	1 901	1 989
Italy	19 848	25 750	28 735	27 252	24 093	23 714	22 018	23 373	24 068	24 532
Latvia	692	655	568	805	198					
Luxembourg	2 141	2 548	2 521	2 208	2 090	2 193	2 127	2 175	2 172	2 228
Netherlands	5 194	6 651	6 937	6 879	6 713	6 964	6 995	6 917	6 781	6 813
Poland	7 128	7 993	8 779	8 366	7 950	8 558	9 198	9 001	10 332	10 167
Portugal	1 614	1 543	1 942	1 960	2 050	2 070	2 030	2 010	2 076	2 215
Romania	2 761	3 721	3 828	3 292	2 985	3 158	3 352	3 276	3 361	3 550
Slovak Republic	3 747	4 583	4 236	4 403	4 511	4 705	4 562	4 808	4 974	5 225
Slovenia	430	606	648	632	618	615	604	613	648	654
Spain	14 358	16 343	15 504	13 639	14 252	14 249	14 845	13 616	14 441	14 320
Sweden	2 804	4 846	4 867	4 326	4 404	4 539	4 557	4 817	4 926	4 654
United Kingdom	10 074	9 708	9 478	9 579	11 858	12 033	10 907	7 635	7 491	7 268
European Union (28)	139 432	172 909	177 791	168 589	166 390	169 215	166 298	162 224	168 515	167 655
World	1 238 749	1 433 432	1 538 021	1 560 444	1 650 423	1 671 128	1 621 537	1 629 096	1 732 171	1 816 611

Quadro 1-3 – Panorama internacional do uso aparente do aço (em toneladas)(WSA, 2019)

	Apparent Steel Use (crude steel equivalent)									
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Austria (1)	3 540	4 002	4 440	4 171	4 066	4 111	4 453	4 366	4 661	4 767
Belgium-Luxembourg (1)	4 230	4 854	5 299	4 472	4 412	4 551	4 557	4 617	4 797	4 883
Bulgaria	785	833	1 127	1 008	1 100	1 526	1 368	1 460	1 102	1 276
Croatia	828	782	702	663	684	675	720	922	947	761
Cyprus	327	366	248	173	139	115	153	164	265	360
Czech Republic (1)	5 207	6 379	6 985	6 747	6 765	7 145	7 600	7 600	8 100	8 500
Denmark	990	1 129	1 530	1 528	1 518	1 521	1 564	1 655	1 583	1 598
Estonia	187	313	375	340	350	365	341	462	506	569
Finland (1)	1 715	1 540	1 225	2 104	1 888	1 875	1 875	1 872	2 170	2 151
France	12 290	15 454	16 304	14 130	14 566	14 472	14 521	15 251	15 771	15 870
Germany (1)	29 100	40 479	45 141	40 829	41 700	43 110	42 433	42 750	43 326	41 884
Greece	2 712	2 055	1 545	1 097	1 230	1 387	1 097	1 626	1 445	1 447
Hungary (1)	1 764	2 420	2 173	1 959	2 144	2 400	2 702	2 928	3 060	3 199
Ireland	382	453	425	436	433	513	605	603	715	759
Italy (1)	21 280	27 212	28 143	22 810	23 218	23 244	25 957	25 157	26 644	27 837
Latvia	290	393	622	214	230	344	293	363	261	482
Lithuania	282	381	472	493	558	631	604	716	722	794
Malta	48	60	36	35	33	42	46	45	37	60
Netherlands (1)	3 662	4 285	4 869	4 996	4 707	4 012	4 423	5 370	5 318	6 041
Poland	8 414	10 309	11 635	10 986	11 241	12 955	13 632	14 049	15 126	16 600
Portugal	2 455	2 659	2 361	2 144	2 509	2 240	2 479	2 405	2 601	3 000
Romania	2 827	3 511	4 025	3 549	3 522	4 085	4 266	4 339	4 475	4 882
Slovak Republic (1)	1 566	2 033	2 082	2 078	2 279	2 419	2 515	2 547	2 755	2 940
Slovenia	957	1 083	1 121	981	968	1 002	1 059	1 132	1 141	1 222
Spain (1)	12 500	14 100	14 000	11 510	11 873	12 449	13 633	13 523	13 648	15 392
Sweden (1)	2 801	3 970	4 244	3 819	3 915	3 695	3 878	4 452	4 743	4 670
United Kingdom (1)	8 832	11 297	11 706	11 125	10 990	11 789	11 883	12 023	12 016	11 934
European Union (28)	129 971	162 350	172 836	154 396	157 036	162 675	168 659	172 397	177 936	183 880
World	1 236 752	1 416 374	1 527 910	1 556 740	1 662 406	1 674 660	1 621 556	1 637 192	1 757 488	1 830 817

1.1.5 Prós e contras do aço

O uso do aço na construção apresenta algumas vantagens relativamente a outros tipos de materiais (Simões, 2007):

- tendo em conta as suas propriedades físicas e mecânicas, o aço possibilita a conceção de estruturas com uma elevada esbelteza, com a capacidade de vencer grandes vãos;
- permite reduzir as dimensões das fundações, dada a leveza global da estrutura;
- como pode ser pré-fabricada em oficina é de fácil montagem, conferindo às estruturas em aço grande rapidez na montagem, sem necessidade de grandes áreas de estaleiro;
- ao atingir logo em pleno as suas capacidades resistentes, logo após a montagem, permite que o aço comece a “trabalhar” logo a partir desse instante;
- versatilidade em adaptar-se a novas configurações ou utilizações;
- facilidade na desmontagem, podendo ser reaproveitada, em parte ou no seu todo, numa nova construção;
- a sua reutilização não se esgota na utilização das peças, mas também na sucata, que pode originar novos aços;
- dada a sua leveza e ductilidade, habitualmente, tem um bom comportamento sísmico, não sendo condicionante no seu dimensionamento (principalmente quando não existem pisos);
- tendo em conta o processo de fabrico (pré-fabricação em ambiente industrial) permitem a exportação para outros mercados.

Em sentido contrário, o aço tem dois aspetos, que podem ser desvantajosos, quando comparados com outros materiais:

- perante uma situação de incêndio, em que a estrutura atinge temperaturas elevadas, as suas propriedades degradam rapidamente, uma vez que a temperatura em elementos de aço aumenta com relativa rapidez devido à sua elevada condutividade térmica e massividade das secções tradicionalmente usadas no setor da construção;
- a sua degradação por corrosão quando exposto às ações ambientais, não permitem atingir a durabilidade pretendida, sem recurso a sistemas de proteção.

Na conceção de uma obra, desde a sua fase inicial, todas estas vantagens e desvantagens têm de ser equacionadas para todos os tipos de materiais que podem servir como solução, para perceber qual é o material que melhor se adequa ao que se pretende executar. Não há dúvida que as vantagens do aço são inúmeras, mas as desvantagens têm de ser analisadas com o maior cuidado, de forma a poder minimizar os seus efeitos. O seu comportamento ao fogo é muitas vezes condicionante, sendo por isso fundamental fazer-se uma análise cuidada, indo para além de métodos simplificados e habitualmente muito conservadores, que penalizam o aço severamente.

A resistência do aço decresce bastante para temperaturas superiores a 400°C, sendo que para 600°C, tem sensivelmente metade da capacidade resistente a 20°C. Quando a capacidade resistente do aço, sujeito a altas temperaturas, é insuficiente, é necessário determinar as medidas de proteção necessárias (pinturas intumescentes, argamassas projetadas, etc), para verificar os requisitos regulamentares.

A durabilidade do aço depende essencialmente da sua resistência à corrosão (não estando sujeito a efeitos de fadiga). A corrosão é caracterizada pela degradação do aço através de um processo químico, que se desenvolve quando o aço está em contacto com humidade, oxigénio, impurezas, entre outros. Para minimizar / eliminar este problema, tem de ser definido uma proteção adequada (pintura, metalização, galvanização, etc) ao grau de corrosividade do local em que está inserida a obra, e também adequada à longevidade temporal pretendida. Além da proteção a adotar, também podem ser tidos em conta outro tipo de precauções na sua conceção, nomeadamente, evitar conceber peças em que a acumulação de águas e detritos é possível, ou zonas de inspeção e manutenção acessíveis, etc.

1.1.6 Conceção de uma estrutura em aço

O aço tem propriedades físicas e mecânicas que permitem conceber estruturas com elevada esbelteza, cumprindo todos os critérios prescritos nos Eurocódigos Estruturais, quer na verificação da estabilidade da estrutura, quer quanto à deformabilidade da mesma.

No desenvolvimento de um projeto, uma das etapas iniciais e das mais importantes, é a conceção estrutural. Todo o desempenho estrutural resulta da conjugação adequada entre um sistema estrutural e os materiais adotados, tendo em conta as propriedades desses mesmos materiais, a capacidade de se adaptarem à arquitetura pretendida, e inevitavelmente, aos custos associados. Qualquer projeto, tem de ter como objetivo a resposta adequada à utilização que é pretendida durante um período de vida pré-estabelecido, cumprindo todas os critérios regulamentares aplicáveis, impedindo o seu colapso (Estados Limites Últimos), garantindo um bom desempenho em serviço (Estados Limites de Utilização), assim como relativamente à sua durabilidade (proteção contra a corrosão). Por isso, é necessário ter atenção a uma série de condicionamentos, nomeadamente: geométricos exteriores e interiores (tendo em conta a arquitetura), funcionais (zonas de aluminação, isolamentos térmicos e acústicos, drenagens de coberturas e elementos de proteção ao fogo), geotécnicos (tipo de fundações e respetiva ligação com a estrutura) e construtivos (transporte e montagem da estrutura). (L. S. Silva & Gervásio, 2020)

1.2 Considerações gerais sobre o betão

1.2.1 O betão como material

O betão é um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, de acordo com a NP EN 206 (IPQ, 2007). Adicionalmente podem ou não ser incorporados outros elementos na sua constituição, de forma a desenvolver outras propriedades por hidratação do cimento. O betão pode ser classificado de várias formas, tendo em conta a massa volúmica (habitualmente na ordem dos 2500 kg/m³), a sua consistência, as condições de exposição às ações ambientais (com diferentes classes de exposição), a dimensão máxima dos agregados, o teor de cloretos e mecanicamente.

Mecanicamente, o betão é um material caracterizado por ter uma grande resistência e ductilidade em compressão, mas em contrapartida, apresenta um mau comportamento em tração. Por isso, para melhorar esse mesmo comportamento em tração, são adicionadas armaduras de aço, funcionando como uma peça conjunta de betão armado ou de betão pré-fabricado.

1.2.2 Construção em betão armado em Portugal

O tipo de estrutura mais utilizada em Portugal continua a ser em betão armado. Grande parte da utilização desta solução está presente maioritariamente em habitações. No entanto, também existem outras tipologias de estruturas, em que se recorre ao betão armado, como por exemplo, pontes, barragens, etc. O betão pré-fabricado surgiu no mercado mais recentemente, tirando partido da produção em fábrica das peças já acabadas, ao contrário da construção mais

tradicional *in-situ*. Estas construções pré-fabricadas mostram-se bastante competitivas em edifícios de grandes dimensões, como por exemplo, edifícios industriais, armazéns, etc, uma vez que conseguem suprir em grande parte, os dois principais problemas que as estruturas em aço têm para resolver: a segurança contra incêndios e durabilidade das peças ao meio ambiente. Por outro lado, o aumento do custo da mão de obra em Portugal e os requisitos relativos à sustentabilidade levantados internacionalmente, são dois dos principais condicionantes deste tipo de estrutura.

1.3 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal, avaliar a competitividade de soluções estruturais em aço para pavilhões industriais, comparando-as com soluções equivalentes em betão pré-fabricado. Para atingir esse objetivo, são definidos 3 objetivos secundários relativamente a um caso de estudo, conforme se descreve nos parágrafos seguintes. O caso de estudo, corresponde uma situação real, no projeto de um armazém, em que o dono de obra escolheu executar o edifício com pré-fabricados de betão, preterindo a solução em aço. O motivo da decisão foi meramente económico, como acontece na maior parte dos casos.

O primeiro objetivo secundário está relacionado com as classes de aço que habitualmente são consideradas em projetos semelhantes a este caso de estudo. Irá ser feita uma análise para este caso de estudo, variando as classes de aço utilizados nos vários tipos de elementos, para compreender se se consegue baixar o custo da solução final, alternando entre as classes de aço S275, S355 e S460.

O segundo objetivo secundário prende-se com o comportamento ao fogo das estruturas metálicas, que na maior parte das vezes, em projeto, é demasiado penalizador para a solução em aço. Isto acontece porque são apenas determinadas as temperaturas críticas dos diversos elementos com base na curva padrão, método habitualmente muito conservador. Para o caso de estudo pretende-se fazer uma análise ao fogo com base no desempenho e assim otimizar o tratamento antifogo, que habitualmente é muito oneroso, quando comparado com o custo global da estrutura.

O terceiro e último objetivo secundário diz respeito à sustentabilidade das diversas soluções estruturais possíveis, com o estudo do ciclo de vida da solução. Como foi referido, o critério de muitos donos de obra, é maioritariamente monetário, não fazendo parte da análise o custo ambiental que as diversas soluções em betão, ou aço, ou outro material, apresentam, principalmente em Portugal, onde este tipo de diretivas ambientais, ainda é olhado com muita relutância.

1.4 Estrutura da tese

A tese está estruturada de forma que todas as informações apareçam de forma lógica e encadeada.

Começando pelo **capítulo introdutório** são aí apresentadas as primeiras noções essenciais relacionadas com o aço assim como os objetivos da dissertação, que servem de base a tudo o que vai ser desenvolvido no âmbito do tema de tese.

No **segundo capítulo**, é abordado de forma mais profunda todos os conceitos teóricos, que servem de base aos objetivos que se pretendem atingir. Numa primeira secção, é apresentada a vertente mais económica desta temática, que muitas vezes é descurada em ambiente académico. Depois será abordada a componente mais técnica, com a enunciação de princípios de conceção de edifícios industriais, cálculo de ações e regras de dimensionamento, com particular relevo para a verificação de segurança de edifícios industriais contra incêndios.

No **terceiro capítulo** é todo em volta de um caso prático, onde é apresentado um pavilhão industrial que foi executado em betão pré-fabricado, e com base nos fundamentos enunciados nos capítulos anteriores, dimensionar a estrutura alternativa em aço, e avaliar a competitividade dessa solução em termos económicos.

No **quarto e último capítulo**, serão enunciadas as conclusões retiradas do que foi desenvolvido nos capítulos anteriores, à luz dos objetivos da dissertação definidos inicialmente.

2 PROJETO DE PAVILHÕES INDUSTRIAIS

2.1 Custos da estrutura metálica

2.1.1 O custo numa fase inicial do projeto

Qualquer dono de obra, pretende fazer a obra com a melhor relação qualidade - custo, com o menor custo possível. Por isso, na fase inicial do projeto devem ser feitos os estudos necessários para definir as geometrias / formas da estrutura do edifício e os respetivos materiais, enquadrando essas soluções no orçamento que está previsto e disponível para ser aplicado. Algumas obras têm desvios muito grandes nos custos finais das empreitadas, porque esta fase inicial é negligenciada, e não é feito o devido estudo dos custos globais dos trabalhos.

Muitas destas escolhas iniciais partem de um projeto de arquitetura, onde habitualmente está definida a geometria do edifício e os materiais de acabamento. O “esqueleto” ou a estrutura, se não for visível, permite que exista a possibilidade para a escolha do material que mais se adequa, variando essencialmente entre o betão armado e o aço estrutural, tendo em conta o preço de cada uma das soluções estruturais, não sendo o custo o único critério de seleção. Se existir uma grande janela temporal, entre o estudo e a execução da obra, os custos planeados podem já não representar a realidade quando for a executar a obra, isto porque existe uma flutuação normal dos preços das matérias-primas. Sendo a estrutura em betão armado, a mais tradicional em Portugal, torna-se fundamental um acompanhamento comercial efetivo e incisivo por parte dos vendedores de estruturas metálicas junto dos donos de obra, numa fase inicial do projeto, para que possam apresentar a solução metálica, enaltecendo todas as suas valências, quer ao nível da qualidade como também do preço.

A escolha do tipo de estrutura é fundamental. É uma decisão que tem de ser tomada, tendo em conta vários fatores, nomeadamente as fundações, revestimentos, acabamentos, etc. Uma alteração do tipo de estrutura a meio do processo, pode levar a uma revisão de todas as especialidades, por isso, esta tem de ser uma decisão fundamentada e de preferência definitiva. Cada vez mais, o tempo urge no ramo das construções, o que leva habitualmente a tomarem-se decisões precipitadas, conduzindo a um aumento dos custos no final e uma menor qualidade da obra, na maior parte das vezes (Corus Construction, 2004).

Os edifícios industriais servem vários tipos de indústrias, como por exemplo, armazenamento de materiais, indústria alimentar, indústria farmacêutica, zonas fabris com escritórios, etc. Apesar de terem vários fins, a maioria das vezes são caracterizados por serem edifícios amplos, de um único andar (rés do chão), compostos por uma *mezzanine* para escritórios numa parte do edifício. Para este tipo de edifícios o habitual é uma estrutura porticada de grandes vãos, reduzindo ao máximo o número de pilares interiores, permitindo ter zonas bastante amplas e limpas.

A proteção ao fogo deste tipo de estruturas deve ser considerada de acordo com o requisito legal aplicável, devendo ser feito de forma rigorosa, porque, como já foi referido, um requisito ao fogo demasiado exigente pode incrementar em muito o custo total da obra.

A altura destes edifícios também é um fator importante, e muitas vezes diferenciador do custo por m² de construção, por isso, quando se comparam soluções estruturais, não se pode analisar cegamente este custo sem olhar para a altura dos pilares. A título de exemplo, um edifício “baixo” pode ter um peso 30 a 40 kg por m², um edifício “alto” pode ter 50 ou 60 kg por m².

2.1.2 Fatores a ter em conta num estudo inicial de custos

Os custos associados a uma nova construção estão dependentes dos seguintes aspetos:

- a sua função e altura de construção: o uso da estrutura tem uma relação direta com o preço que uma estrutura pode ter. Do ponto de vista meramente estrutural, tem logo implicações diretas nas sobrecargas de utilização a adotar conforme a EN 1991-1-1 (CEN, 2002). Do ponto de vista arquitetónico, diferentes utilizações, podem resultar em vãos maiores e alturas livres maiores. Por exemplo, um edifício industrial tem um custo por m² inferior quando comparado com um edifício de vários pisos. Em edifícios onde é requerido grandes vãos livres, com a supressão de pilares, nomeadamente em naves industriais, é possível executar essa estrutura com peças de aço, mas que são inevitavelmente mais pesadas para vencer esses vãos, o que leva a um aumento do peso da estrutura por m². Na avaliação destes custos por m², é preciso ser criterioso, uma vez que muitos destes custos unitários não têm em conta a altura do edifício, ou diferentes cargas aplicadas, o que pode deturpar o resultado;
- a geometria e a sua complexidade: muitas vezes são apresentadas arquiteturas muito mais complexas, que obrigam a soluções bastante engenhosas, e também onerosas para fazer cumprir essa mesma arquitetura. Esta é uma tendência cada vez mais acentuada atualmente, com geometrias cada vez mais complexas, mesma aquelas que à partida poderiam ser mais simples, tais como os pavilhões industriais, que no passado eram quase todos com uma geometria muito quadrada e pormenores construtivos mais simples. Apesar disso, o aço é um material que consegue combater eficazmente este

problema, uma vez que se conseguem produzir secções, ou ligações à medida do que é pretendido na arquitetura, podendo adaptar-se a quase todas as geometrias;

- a localização da obra: um dos fatores mais importantes está relacionada com a localização da obra. É preciso considerar todos os custos relativos à logística da obra, como por exemplo, a distância da fábrica à obra, meio de transporte, meio urbano ou industrial, acessos, etc. Em especial para obras em meio urbano, que neste capítulo precisam de ser bem estudadas, uma vez que pode haver restrição de horários para acesso, de barulho, de funcionamento de uma grua, etc, em suma, há uma série de variáveis que precisam de ser acauteladas, correndo o risco de encarecer bastante o orçamento inicial.
- o panorama económico: como já foi referido, os preços das matérias-primas, nomeadamente do aço, tem algumas flutuações ao longo do tempo, que podem tornar mais imprevisível as estimativas de custo que uma obra poderá ter. Quanto maior é a instabilidade económica a nível global, maior é a incerteza do preço desta matéria-prima. Na perspetiva de Portugal, sendo o aço uma matéria-prima quase exclusivamente importada, significa que o preço e a disponibilidade do aço estão suscetíveis a vários riscos económicos a nível global. Isto faz com que algumas metalomecânicas optem por fazer mais stock que outras, de forma a poder ultrapassar situações em que o aço está mais caro, ou não está disponível pelos armazenistas, não dando resposta à procura que existe.

2.1.3 Custos associados à construção metálica

Para tentar baixar os custos associados à construção metálica, de forma a tornar as soluções mais competitivas economicamente, em primeiro lugar é fundamental perceber as diversas componentes associadas a este custo global, explicadas graficamente na Figura 2-1.

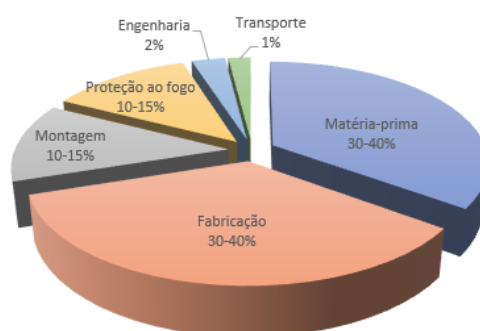


Figura 2-1 – Peso dos vários componentes de um custo global (SCI, 2021)

Como se pode perceber através da representação esquemática ilustrada na Figura 2-1, podem-se repartir os custos 6 partes. Os maiores custos habitualmente estão repartidos entre o custo da matéria-prima (perfis, chapas, etc) e os custos de produção (corte, pré-montagem, soldadura, enformados a frio, etc), que andam entre os 30 e 40% para cada uma destas parcelas. Este custo de fabricação pode variar tendo em conta a complexidade do tipo estrutura a fabricar. Por exemplo, o custo por tonelada do fabrico de uma treliça é bastante superior que o de uma peça linear. Ainda na parte produtiva, a pintura tem um custo na ordem dos 10% do custo total, dependendo do esquema de pintura preconizado em projeto. No entanto, este custo da pintura pode ser bastante inflacionado, devido aos requisitos antifogo que muitos projetos requerem. Quando é requerida pintura intumescente na estrutura, na ordem dos 60 ou mais minutos, este custo pode ter um incremento muito grande, podendo chegar aos 40% do custo total da obra. Quando isto acontece, muito provavelmente, a solução em aço deixa de ser competitiva. Uma outra fatia, corresponde à montagem da estrutura metálica. Se não envolver meios muito específicos, devido à complexidade, ou dificuldade de acessos, etc, este custo ronda os 10 ou 15% do custo total da obra. Com menor impacto, existem os custos de transporte, custos com o trabalho de engenharia, e outros custos administrativos, que habitualmente têm um impacto menor (na ordem dos 2 ou 3%) no custo total da obra (SCI, 2021).

2.2 Princípios de dimensionamento

2.2.1 Regulamentação

No dimensionamento de uma estrutura, seja esta de aço, de betão ou de outro material, têm de ser verificados uma série de critérios para Estados Limites Últimos, que garanta que a estrutura não colapsa, pondo em risco a segurança das pessoas. Além desta, também têm de ser verificadas as condições em Estados Limites de Utilização que são específicas do tipo de utilização do edifício, sendo que em estruturas metálicas estas condições estão associadas a deformações máximas e vibrações. Para o dimensionamento de estruturas metálicas, têm de ser cumpridos todos os requisitos aplicáveis na EN 1993-1-1 (IPQ, 2010) e em situação de incêndio a EN 1993-1-2 (IPQ, 2010). Uma vez que o objetivo desta tese é a comparação com as estruturas de betão, importa referir que estas são verificadas segundo a EN 1992-1-1 (IPQ, 2010) e para a situação de incêndio, conforme a EN 1993-1-2 (IPQ, 2010). Em pavilhões industriais que tenham pisos intermédios, com recurso a lajes e vigas mistas, estas devem cumprir os critérios da EN 1994-1-1 (IPQ, 2011), e da EN 1994-1-2 (IPQ, 2011) para a situação de incêndio. A ação sísmica deve ser tida em conta com base na EN 1998-1 (IPQ, 2010).

Apesar de em Portugal o R.S.A. (Ministério da habitação, 1983) ainda ser válido para o cálculo de ações, num futuro próximo o cálculo, majoração e quantificação de ações serão efetuadas unicamente através dos Eurocódigos Estruturais.

2.2.2 Conceção de um pavilhão industrial

Um pavilhão industrial tipicamente é idealizado como uma estrutura porticada, sendo constituído pelos pórticos principais (colunas e vigas), estrutura secundária (madres de cobertura e fachada de apoio aos revestimentos) e um sistema de contraventamentos, do tipo de construção apresentada na Figura 2-2 (P. M. Martins & Pedro, 2020).



Figura 2-2 – Edifício metálico porticado

Este tipo de estrutura tem-se revelado bastante eficaz, com os pórticos a constituírem o esqueleto principal e orientados na menor direção do edifício em planta. A estrutura secundária desenvolve-se perpendicularmente aos pórticos, suportando os revestimentos de cobertura e fachada, iluminação, condutas, etc, encaminhando estas ações para a estrutura principal, que por sua vez, transmitem para as fundações. O sistema de contraventamentos tem como principal função absorver as ações horizontais, nomeadamente quando estas atuam perpendicularmente ao plano do pórtico, para as encaminhar para as fundações, reduzindo consideravelmente as deformações nessa mesma direção.

No dimensionamento de um pavilhão industrial, a estrutura principal é habitualmente composta por várias peças lineares, que podem ser perfis de siderurgia ou por soldadura de chapas (para secções que não estão disponíveis comercialmente, ou para tirar partido de secções variáveis). Para a estrutura secundária são mais habituais perfis enformados a frio que as secções laminadas, uma vez que conseguem ter um bom desempenho, sendo extremamente leves, tornando esta uma solução económica. Estas secções resultam da quinagem ou perfilagem de

chapas de espessura fina, normalmente até 3mm, resultando em configurações do tipo C, ômega ou outros (ver Figura 2-3). Estas peças já são quinadas ou perfiladas com o tratamento anticorrosivo aplicado, variando entre o galvanizado e os lacados.



Figura 2-3 – Madre em Z e C

Os revestimentos, quer de cobertura, quer de fachada, desempenham a função de proteger o interior do edifício das ações climáticas exteriores, do ponto de vista térmico e acústico. Também conseguem ter funções portantes, uma vez que são capazes de suportar outro tipo de cargas permanentes e variáveis, tais como coberturas ajardinadas, sobrecargas de manutenção, etc. No passado grande parte dos revestimentos de cobertura de pavilhões industriais eram constituídos por chapas de fibrocimento, na atualidade estas chapas foram sendo erradicadas e substituídas, devido às propriedades nocivas do amianto. Nos dias de hoje são habitualmente adotados revestimentos em chapas de policarbonato, chapas de alumínio, chapas perfiladas com ou sem isolamento, entre outras. As chapas de policarbonato são utilizadas para zonas de entrada de luz natural, e por necessitarem de mais apoios (madres) por serem menos resistentes que as chapas perfiladas de aço, torna-se numa solução mais dispendiosa. Por isso, as chapas perfiladas de aço tendem a ser a solução mais comum em revestimentos de pavilhões industriais, por serem soluções leves, com bom acabamento e que garantem uma boa durabilidade da solução. Adicionalmente, as chapas de aço (habitualmente com espessuras entre os 0,5 e 1mm) conferem um efeito de diafragma, solidarizando as cargas por toda a área de cobertura, como também reduz o efeito de bambeamento das madres. Ainda sobre este tipo de revestimentos, existem duas variantes: com ou sem isolamento. Este isolamento confere melhoramentos no seu comportamento térmico e acústico, e é aplicado entre duas chapas de aço, formando os painéis sandwich representados na Figura 2-4, muito utilizados atualmente. Existem vários tipos de materiais isolantes, tais como poliuretano (PUR) ou poliisocianurato (PIR), lã de rocha ou lã de vidro. Este tipo de revestimento permite vencer maiores vãos entre madres, sendo necessário maiores cuidados nas fixações dos painéis com as madres e entre painéis, que se forem mal executadas, irão resultar em infiltrações e degradações rápidas dos materiais. Outra variante são as soluções chapa-lã-chapa, sendo a montagem em obra feita em 3 fases: em primeiro lugar, aplica-se a chapa inferior, depois coloca-se a lã de vidro ou de rocha e perfis separadores, e por último é colocada a chapa superior. Este tipo de solução é mais habitual em reabilitações, quando se quer aproveitar a cobertura existente e pretende-se conferir algum isolamento com uma nova cobertura. Na conceção da estrutura de um pavilhão industrial,

tem de se ter em conta estes revestimentos; podem ser dimensionados com base em tabelas de dimensionamento dos fornecedores, que habitualmente fornecem as cargas máximas aplicáveis para Estados Limites Últimos, tendo em conta o espaçamento entre madres, e também a deformação máxima (habitualmente $L/200$) para Estados Limites de Serviço.



Figura 2-4 – Painel sandwich de cobertura (PIR)

Além de todas as componentes de um pavilhão metálico anteriormente referidas, existem outros elementos terciários, como por exemplo, os remates de acabamento em chapa lacada, sistema de drenagens de águas como as caleiras e os tubos de queda, ou estruturas de acesso, como portas e portões. Apesar de estruturalmente estes elementos não terem grande influência no comportamento global da estrutura, são bastante importantes para a funcionalidade e durabilidade da construção (M. P. Martins & Pedro, 2020).

2.2.3 Dimensionamento de acordo com os Eurocódigos

De forma resumida, uma vez que o procedimento de cálculo é do conhecimento generalizado, apresenta-se de seguida as principais etapas e algumas considerações que são tomadas, no cálculo e dimensionamento deste tipo de edifícios. O edifício que será objeto de estudo é localizado em Portugal, e por isso são tidas em conta as recomendações do Anexos Nacionais dos respetivos Eurocódigos.

2.2.3.1 Quantificação de ações

A determinação das ações é feita recorrendo às diversas partes dos Eurocódigo 1, nomeadamente para o cálculo de pesos próprios, sobrecargas de utilização, ação da neve, ação do vento e ações térmicas. A ação do fogo será abordada com maior detalhe mais à frente. A análise da ação sísmica, de acordo com o Eurocódigo 8, foi dispensada, uma vez que para esta tipologia de edifícios, sem pisos ou *mezzanines*, não é exetável que esta ação tenha um impacto significativo no dimensionamento, já que a massa total do edifício é muito baixa.

Em edifícios industriais, a categoria de utilização para a quantificação da sobrecarga, é do tipo H, de acordo com a EN1991-1-1, uma vez que são coberturas não acessíveis, exceto para intervenções de manutenção, na grande maioria dos casos.

A ação da neve, avaliada de acordo com a EN 1991-1-3 (IPQ, 2009), também é considerada, apesar de que em grande parte do território nacional ser pouco relevante; esta ação apenas tem impacto em edifícios em regiões geográficas a elevadas altitudes, onde é expectável a queda de neve. As mesmas considerações já não são aplicáveis a outros países da Europa, como por exemplo França, que tem tradição de ser um mercado bastante presente para as empresas portuguesas exportadoras. Nestes casos, a ação da neve torna-se uma ação variável condicionante, sendo habitual adotar inclinações das coberturas mais acentuadas, de forma a contrariar a severidade da ação.

O vento calculado através da EN 1991-1-4 (IPQ, 2010), é uma ação muito preponderante no dimensionamento deste tipo de edifícios. Para a determinação dos valores da ação é preciso ter em conta vários fatores, como por exemplo, a orografia do local, a localização, se tem platibanda, etc. Depois é necessário considerar diferentes casos de carga, em que se varia o sentido de incidência do vento, coeficientes de pressão e sucção. Neste tipo de edifícios, as forças de atrito e coeficientes estruturais na grande maioria dos casos não são aplicáveis.

Por último, as ações térmicas avaliadas de acordo com a EN 1991-1-5 (IPQ, 2009), dependem da localização da construção. Como habitualmente a estrutura fica escondida pelo revestimento, os elementos metálicos não ficam expostos, não havendo variações diferenciais; em geral apenas são consideradas as variações uniformes de temperatura.

Adicionalmente, a EN 1993-1-1 prevê a inclusão de efeitos resultantes de imperfeições geométricas e tensões residuais. Os efeitos dessas imperfeições quando os elementos estruturais estão submetidos a cargas verticais devem ser avaliados segundo as duas direções (x e y). Não são introduzidas as imperfeições locais dos elementos, uma vez que estas já são consideradas nas curvas de encurvadura dos elementos nas verificações preconizadas pela EN 1993-1-1.

2.2.3.2 Combinação das ações

Para a verificação de segurança em relação aos diversos estados limites são consideradas as combinações de ações cuja atuação simultânea é considerada verosímil e que produzem na estrutura os efeitos mais desfavoráveis.

No dimensionamento dos elementos estruturais para Estados Limites Últimos, os valores de cálculo dos esforços atuantes são obtidos para combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias através das combinações fundamentais, definidas pela seguinte expressão geral, segundo a EN 1990 (IPQ, 2009):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

Em que $\gamma_{G,j}$ corresponde ao coeficiente parcial relativo à ação permanente j , $G_{k,j}$ é valor característico da ação permanente j , γ_P é o coeficiente parcial relativo a ações de pré-esforço, P é o valor representativo de uma ação de pré-esforço, $\gamma_{Q,1}$ é o coeficiente parcial relativo à ação variável 1 , $\gamma_{Q,i}$ é o coeficiente parcial relativo à ação variável i e $\psi_{0,i}$ é o coeficiente para a determinação do valor de combinação da ação variável i .

A verificação da segurança da estrutura relativamente aos Estados Limites de Utilização é efetuada para a combinação característica de ações, de acordo com a EN 1990 através da seguinte expressão geral:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

2.2.3.3 Verificação de segurança – Estados Limites Últimos (ULS)

A verificação de segurança relativamente ao estado limite último de resistência, de acordo com a EN 1990, é efetuada em termos de esforços respeitando a condição:

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

Em que E_d é o valor de cálculo do efeito das ações e R_d é o valor de cálculo da resistência correspondente.

2.2.3.4 Verificação de Segurança - Estados Limites de Utilização (SLS)

A verificação da segurança relativamente aos Estados Limites de Utilização é efetuada garantindo que as deformações, calculadas para a combinação característica de ações, não excedem os valores limites admissíveis.

Relativamente às vigas, os deslocamentos verticais devem ser limitados ao valor de $L/150$, sendo L o vão da viga. Já as deformações horizontais nos pilares são limitadas a um valor de $h/150$, sendo h a altura do edifício. Estes valores são os recomendados do Anexo Nacional da EN 1993-1-1.

2.2.3.5 Classe de Execução

O Anexo C da EN 1993-1-1:2005/A1:2014 define o critério de classe de execução, que está relacionado com o nível de exigência do fabrico e da montagem da estrutura metálica, de modo a garantir a fiabilidade da estrutura e que esta é executada de acordo com os pressupostos assumidos em projeto. Para definir esta classe é preciso considerar 2 parâmetros:

- classe de consequência (CC)– em caso de colapso, as consequências ao nível de perdas humanas, económicas, sociais ou ambientais. De acordo com a EN 1990 a classe de consequência está diretamente ligada à classe de fiabilidade (RC);
- tipo de ação – atividade sísmica onde a estrutura está inserida e a possibilidade de ocorrência de fenómenos relacionados com a fadiga.

2.3 Tipos de aço

2.3.1 Considerações gerais

A EN 10025 define os vários tipos de aço que previstos para a execução de estruturas em aço na Europa. Na construção metálica, os aços utilizados na construção de edifícios são os aços mais macios (S275 ou S355), sendo os aços considerados de alta resistência (S460 ou superior) mais utilizados em estruturas especiais, como por exemplo, em pontes, ou em torres eólicas.

Os aços estruturais previstos na EN 10025 (designados com a letra inicial “S”), têm na tensão de cedência (f_y) a sua maior diferença. A ductilidade também é um fator importante que vem na sequência da sua tensão de cedência, sendo mais dúcteis aqueles que têm uma tensão de cedência mais baixa e consequentemente têm uma capacidade superior para deformar até atingirem a tensão última, que corresponde ao colapso da peça. A Figura 2-5 apresenta um gráfico tensão-extensão, que permite perceber as diferenças mecânicas entre os aços mais utilizados em construção metálica.

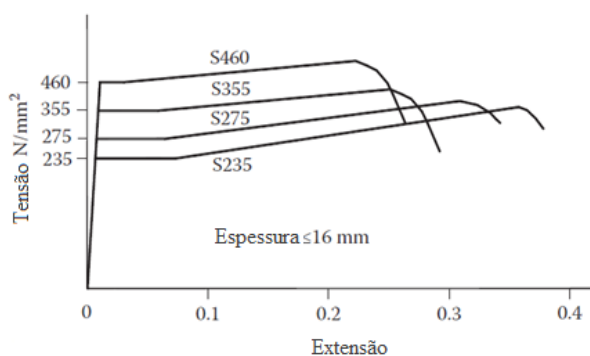


Figura 2-5 – Relação tensão-extensão para os diferentes tipos de aços

O aço é um material heterogéneo na sua espessura, ou seja, a sua composição granular difere dos extremos da chapa para o seu interior. Daí resulta uma degradação das propriedades mecânicas que deve ser equacionado para chapas ou perfis superiores a 16 mm de espessura. Nestes casos, a tensão de cedência indicada na designação do tipo de aço deve ser reduzida de acordo com a EN 10025-2 (ver Quadro 2-1), segundo o Anexo Nacional da EN 1993-1-1:

Quadro 2-1 – Excerto do quadro da EN 10025-2 sobre as tensões de cedência

Designation		Minimum yield strength R_{eH} ^a MPa ^b								
According EN 10027-1 and CR 10280	According EN 10027-2	Nominal thickness mm								
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^c
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	-
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	-
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S450J0 ^d	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-

Os perfis tubulares, de acordo com a EN 10210 (CEN, 1997) ou EN 10219 (CEN, 2006), também têm propriedades semelhantes aos perfis abertos com a mesma classe de resistência.

Uma outra propriedade que é necessário ter em conta na definição dos aços a utilizar num edifício é a tenacidade. Em condições de temperaturas baixas (0 °C ou negativos), os elementos de aço podem passar a tender um comportamento frágil, e desse modo perdem capacidade para resistir à propagação de fendas. Sempre que existam dúvidas sobre o tipo de aço a utilizar, tendo em conta os parâmetros de tenacidade e propriedades de elementos soldados que podem estar sujeitos a fenómenos de arrancamento lamelar, a EN 1993-1-10 (IPQ, 2010) fornece orientações nesse sentido.

Se os elementos de aço tiverem requisitos para resistir à fadiga, esse facto também deve ser tido em conta na escolha do tipo de aço. Habitualmente, este parâmetro não é condicionante em pavilhões industriais, sendo bastante mais relevante, em estruturas especiais, como as pontes.

2.3.2 Utilização de aço no mercado português

Em Portugal, atualmente, em pavilhões metálicos de dimensão pequena / média de poucos milhares (ou centenas) de m² de área em planta, o mais habitual é encontrar obras com aços da classe S275. No entanto, cada vez mais surgem projetos com aços da classe S355, mesmo neste tipo de construção mais simples. Obras deste género em S460, são raras ou mesmo inexistentes em Portugal. O mesmo não acontece noutros países da União Europeia, que já começam a “banalizar” este tipo de aços neste tipo de pavilhões. Isto acontece também por causa dos requisitos de tenacidade devido às temperaturas baixas dos países do centro e norte da Europa, que levam a uma seleção de materiais mais restritiva do que aquela que é feita em Portugal.

Há alguns anos, as metalomecânicas trabalhavam essencialmente com o aço S235, e ocasionalmente, em projetos mais exigentes recorriam a aços da classe S275. Os próprios armazenistas e siderurgias tinham bastante stock deste tipo de aço comparando com outras classes de resistência superior. Por isso, continuava a usar-se o aço S235, porque o preço era mais reduzido e também porque havia uma disponibilidade de entrega quase imediata. Atualmente, o panorama nacional alterou-se, sendo que agora o aço S275 é a classe de aço considerada a “normal” e o aço S355 considerado a “especial”. O aço S235 já é pouco utilizado na indústria metalomecânica portuguesa (alguns perfis UNP e cantoneiras). Por sua vez, o aço S355 já aparece algumas vezes especificado em projetos de edifícios industriais. Isto pode ser explicado pela competitividade que existe no mercado atualmente e que obriga os projetistas a apresentarem soluções cada vez mais otimizadas. Consequentemente, houve uma evolução dos softwares de cálculo, que tornaram mais expeditas as comparações entre soluções com vários tipos de aços. Os fornecedores de aço também estão mais bem preparados para poder servir os intuítos das metalomecânicas, uma que vez conseguem ter uma variada gama de produtos de várias classes, garantindo prazos de entrega curtos. Este fator é bastante importante nos dias de hoje, porque o tempo urge, desde a data em que é assinado um contrato de obra até ao momento em que se está a iniciar a montagem da estrutura metálica em obra, e por isso as empresas têm de cumprir prazos de execução muito curtos. As dificuldades dos fornecimentos da matéria-prima, podem ser minimizadas se as empresas fizerem encomendas de grandes quantidades de uma só vez (habitualmente um valor mínimo de 5 toneladas por perfil); no entanto nem todas as obras têm áreas superiores a 5000 m², e por isso as empresas evitam fazer grandes stocks, ou por falta de capacidade de armazenagem, ou por não quererem perder liquidez das suas contas, fazendo um investimento considerável sem saber quando é que virá o seu retorno.

Muitas vezes, o projetista de uma obra, e neste caso particular de um pavilhão industrial, não está diretamente ligado à metalomecânica que vai produzir a obra. Isto faz com a escolha da classe do aço para o projetista seja por vezes sem critério entre o S275 e o S355. Apesar da solução em S355 ser (à partida) mais leve que a solução em S275, não significa que venha a ser

a solução mais económica. Isto porque, o diferencial de preço por kg dos dois tipos de aço, pode não compensar a poupança de peso. O mesmo raciocínio pode ser extrapolado para o aço S460. Quando o projeto é realizado por um engenheiro pertencente à metalomecânica, esse projeto tendencialmente será em aço S275, porque grande parte das metalomecânicas executa pavilhões industriais em S275 em 90% dos casos (à exceção de 3 ou 4 empresas nacionais de maior dimensão). Essa escolha dá um conforto adicional ao projetista, porque é um material que é fácil de encontrar no mercado, a trabalhabilidade do material em fábrica é conhecida, possibilita a reutilização de material em stock, nomeadamente as chapas de ligação, etc. Ou seja, opta-se pelo material que é mais conhecido, mais previsível, e para o qual todos estão mais rotinados, muitas vezes sem verificar se uma solução noutra classe de aço poderia ser mais económica.

Em estruturas porticadas de grande vão, como acontece nos pavilhões industriais, as vigas são muitas vezes condicionadas pela deformabilidade (SLS). Consequentemente, a subida de classe do aço poderá não alterar o seu desempenho, uma vez que a tensão de cedência não tem qualquer influência na sua deformabilidade. Nestes casos, a análise da solução mais económica pode incluir toda a estrutura em S355, à exceção das vigas em S275. Da mesma forma, se os pilares forem articulados, a deformação no topo dos pilares (secção de ligação às vigas) pode ser limitativa, e como tal a subida de classe do aço pode não representar qualquer vantagem.

Uma última nota na escolha dos tipos de materiais, diz respeito aos perfis tubulares, utilizados habitualmente no sistema de contraventamentos da estrutura, fabricados de acordo com a EN 10210 (laminados) ou EN 10219 (enformados a frio). O custo do tubo laminado é superior ao custo do tubo enformado a frio e o seu prazo de entrega por parte dos fornecedores pode ser muito alargado, porque as siderurgias só produzem esse tubo quando as quantidades assim o justificam. Em Portugal, apenas há fabricantes do tubo da EN 10219. Esta situação pode comprometer os prazos de execução de uma obra, sendo que o fabricante da estrutura muitas vezes vê-se obrigado a pedir uma solução alternativa ao projetista, visto que não consegue encontrar solução no mercado para ir ao encontro ao que estava projetado. Apesar de ter um comportamento melhor à encurvadura quando sujeito à compressão, a definição deste tipo de tubo em projetos de estabilidade é de evitar, mesmo que seja necessário aumentar secções.

2.3.3 Precauções a ter na escolha do tipo de aço

Além dos custos por kg da matéria-prima e a sua disponibilidade no mercado, devem ser tidos em conta outros fatores que podem ter influência na melhor solução para a execução do pavilhão industrial:

- classe de execução – apesar de não ter uma relação direta como outrora teve (antes do surgimento do Anexo C da EN 1993-1-1:2005/A1:2014), a classe do aço tem influência na análise sísmica de acordo com a EN 1998-1, quanto à sua classe de ductilidade

- sísmica (DCL, DCM ou DCH), que pode afetar a determinação da classe de execução. Quanto maior a classe de execução, maior é o custo por kg de aço produzido, uma vez que há um aumento do controlo de qualidade associado às diversas etapas de produção;
- marcação CE – a legislação portuguesa obriga que todos os fabricantes de produtos de construção de aço, devem ter marcação CE nos seus produtos, ou seja, devem cumprir todos os requisitos aplicáveis da EN 1090 para a classe de execução determinada pelo projetista e para a classe do aço pretendida. As metalomecânicas elegíveis para realizar uma obra em aço S275, são em menor número para aços S355, e ainda menos para a classe S460, por isso a escolha da classe do aço pode limitar o número de alternativas disponíveis no mercado para dar resposta ao tipo de estrutura que se pretende executar.
 - requisitos de dureza do bordo livre depois do corte – quanto mais duros os aços, mais suscetíveis estão a problemas de durezas na atividade de corte e furação, especialmente quando se utiliza o corte térmico (plasma, oxicorte, etc). Este facto encarece o controlo de qualidade inerentes a estes processos;
 - coordenação de soldadura – de acordo com a EN 1090, o nível do coordenador de soldadura, depende da classe de execução e da classe do aço a utilizar. Com o aumento da classe de aço, o coordenador requerido poderá subir para o nível compreensivo (C), que é o nível mais alto. Mais uma vez, esta alteração resultará em mais custos de produção;
 - procedimentos de soldadura adequados – os fabricantes da estrutura têm de ter qualificação de procedimentos de soldadura para as classes de aço preconizadas em projeto. Estas qualificações podem ser bastante onerosas para o fabricante;
 - trabalhabilidade do material em fábrica – quanto maior é a classe do aço, mais duro é, por isso em algumas máquinas, nomeadamente aquelas mais rudimentares de corte por deformação plástica (ou por cisalhamento), tais como as guilhotinas e as punçadoras, pode dificultar a operação e conseqüentemente tornar mais demorado o corte, alterando os rácios de produção.

Nesta listagem de fatores, apresentou-se essencialmente obstáculos que podem surgir ao nível de controlo de qualidade, decorrentes da escolha da classe do aço. Todos os pontos estão relacionados com a classe de execução determinada. Se for selecionada uma empresa que esteja habilitada a executar a estrutura na classe de execução e na classe de aço pretendida, todos os outros pontos estão automaticamente englobados no preço por kg. Como já foi referido anteriormente, em Portugal, estes custos adicionais devido ao controlo da qualidade continuam a ser vistos como custos prescindíveis pelo dono de obra ou o empreiteiro geral, resultando muitas vezes, na contratação de empresas que não possuem habilitações legais para executar a obra e assim apresentam preços mais baixos, criando assim concorrência desleal para as empresas que são cumpridoras. Isto continua a acontecer porque a entidade fiscalizadora das

atividades económicas (ASAE) continua a não ter capacidade para conduzir essas mesmas fiscalizações junto das empresas fabricantes de produtos de construção em aço.

2.4 Dimensionamento ao fogo

As ações referidas anteriormente no subcapítulo 2.2.3.1, são aquelas que entram em conta num dimensionamento “à temperatura ambiente”, merecendo agora destaque a ação do fogo.

2.4.1 Considerações gerais

Fisicamente, o incêndio pode ser explicado através de 3 processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, conforme se ilustra na Figura 2-6.



Figura 2-6 – Representação esquemática dos modos de transferência de calor

Numa situação de incêndio, em resultado desses processos de transferência de calor, a temperatura do aço aumenta, o que faz decair as suas propriedades mecânicas. Por isso, quando começaram a surgir imposições regulamentares na segurança contra incêndios, em 2008 com o aparecimento do Decreto-Lei nº 220/2008 (Ministério da Administração Interna, 2008), as construções executadas com estrutura metálica foram muito penalizadas, uma vez que a introdução desta ação térmica, em muitos casos, obriga à utilização de material de proteção passiva ou ao aumento das secções transversais quando comparado com o necessário para os restantes cenários à temperatura ambiente, perdendo competitividade com outros materiais de construção, que geralmente apresentam melhores desempenhos sob a ação fogo. O mau comportamento do aço sob altas temperaturas prende-se essencialmente com a elevada condutibilidade térmica e massividade das secções usadas, que propaga o calor ao longo da peça muito rapidamente, e também devido à rápida degradação das propriedades mecânicas com esse aumento da temperatura. Sabendo isto, é essencial executar um estudo detalhado da resistência das estruturas metálicas sob a ação do fogo, de forma a serem menos penalizadas, garantindo a evacuação dos ocupantes do edifício atingido pelo incêndio, como também a segurança das equipas de intervenção, durante um período de tempo previamente estabelecido, de acordo com a legislação em vigor.

Nem sempre houve esta preocupação por parte da sociedade, acerca do comportamento e possível preservação das estruturas quando atingidas por um incêndio. A nível europeu surgiu o Regulamento nº 305/2011 (CEE, 2011), que estabelece condições para a comercialização de produtos de construção dentro do espaço europeu, cumprindo:

- a capacidade resistente das estruturas com funções de suporte por um período determinado durante um incêndio;
- a limitação da produção e propagação do fogo e do fumo no interior das edificações afetadas por um incêndio;
- a limitação da transmissão do fogo para as construções vizinhas;
- a evacuação em segurança dos ocupantes dos edifícios atingidos pelo incêndio por um determinado tempo limite;
- a garantia de segurança das equipas de socorro ao incêndio, para que possam desempenhar a sua função de mitigação do incêndio, durante um determinado período de tempo.

No desenvolvimento destas normas harmonizadas para a segurança contra incêndios em edifícios, algumas medidas foram introduzidas na legislação, com a implementação de medidas de proteção passiva e ativa. Estas medidas dependem de muitos fatores, como por exemplo os dispositivos de deteção e extinção de incêndios automática, ventilação, carga de incêndio no compartimento, etc. Por isso, a problemática da segurança contra incêndios em edifícios é uma área multidisciplinar, que deve envolver várias áreas, e não só o projeto estrutural em si.

2.4.2 Imposições regulamentares

Dando sequência às diretivas do regulamento europeu, em Portugal, também foram elaboradas leis que vão ao encontro a essas linhas orientadoras europeias, nomeadamente o Decreto-Lei nº 220/2008 de 12 de novembro, o Regime Jurídico da Segurança contra incêndios em edifícios (RJ-SCIE), entre outros igualmente relevantes. Além disso, os Eurocódigos tornaram-se obrigatórios, conforme o Despacho Normativo nº 21/2019 (Gabinete do Secretário de Estado das Infraestruturas, 2019), tendo o projetista a missão de considerar a ação do fogo no seu dimensionamento estrutural.

Resumindo, o projetista, na elaboração do projeto de estabilidade de um edifício no que concerne à ação do fogo, tem de cumprir os requisitos legais para determinar, por exemplo, a categoria de risco, tempo requerido, etc, assim como, no dimensionamento propriamente dito, as verificações de segurança descritas nos Eurocódigos estruturais aplicáveis.

A ação do fogo, que à luz dos Eurocódigos é tratada como uma ação acidental, deve ser alvo de uma análise detalhada, de acordo com as seguintes etapas:

- selecionar os cenários de incêndio que melhor se adequam à realidade;
- determinar as curvas de incêndio de cálculo, que correspondam a esse cenário idealizado;
- calcular a evolução da temperatura das peças estruturais sob a ação do fogo, previamente determinada;
- verificar a capacidade resistente dos elementos estruturais, tendo em conta essa variação de temperatura devido à ação do fogo.

Analisando a regulamentação portuguesa, e dependendo do tipo de elemento estrutural que está a ser analisado, podem ser definidos diferentes requisitos, tal como ilustrado na Figura 2-7:

- critério *R* (capacidade de suporte de carga), para elementos com função de suporte de carga, tais como, estrutura principal, lajes, paredes resistentes, em que é necessário verificar o critério de resistência mecânica desses mesmos elementos;
- critério *E* (estanquidade), para elementos com função de compartimentação, como lajes e paredes divisórias, em que é necessário validar a estanquidade do elemento, ou seja, a capacidade do elemento para evitar a propagação das chamas ou gases inflamáveis, impedindo que atravesse para a face não exposta deste mesmo elemento;
- critério *I* (isolamento térmico), adicionalmente ao requisito de estanquidade, alguns dos elementos sujeitos ao fogo, têm a capacidade para isolar termicamente, não passando calor para a outra face.

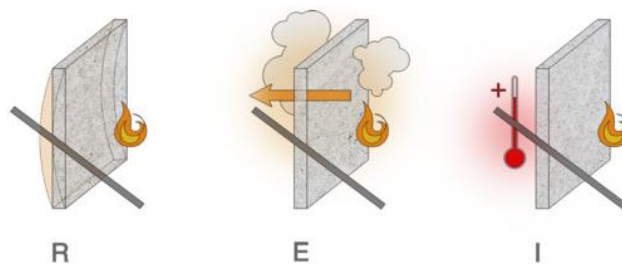


Figura 2-7 – Critérios REI da legislação de segurança contra incêndios

Além dos critérios a cumprir face à legislação em vigor, os elementos a dimensionar são classificados segundo uma escala em ordem ao tempo. Isto é, a partir de algumas características intrínsecas do edifício, é determinado qual é o tempo mínimo limite para o qual esses critérios têm de continuar a ser válidas. Por exemplo, é possível encontrar elementos R30, que têm somente função de suporte durante 30 minutos. Como também é comum encontrar o requisito REI30, que para além da função de suporte também tem de ser estanque e fazer isolamento

térmico durante 30 minutos. O mais comum, e mais ligado à construção metálica pesada é o critério *R*.

Conforme a legislação em vigor, nomeadamente no Artigo 15 do Decreto-Lei da segurança contra incêndios em edifícios, o primeiro passo a dar passa por determinar a utilização tipo do edifício em estudo. Isto significa que a classificação que irá ser atribuída ao edifício depende do tipo de utilização que este irá ter durante a sua vida útil. Existem 12 categorias na legislação portuguesa, sendo que o tipo de edifícios que se pretende analisar no âmbito desta dissertação, corresponde à categoria XII – indústrias, oficinas e armazéns.

Além da utilização tipo, existem outros fatores que condicionam a classificação ao fogo de um edifício, tais como: a sua altura, o número de pisos, as áreas de ocupação e a densidade de carga de incêndio (modificada), usados para determinar a categoria de risco (ver Quadro 2-2).

Quadro 2-2 – Categoria de risco para a utilização tipo XII

Categorias de risco da utilização-tipo XII «Industriais, oficinas e armazéns»			
Categoria	Critérios referentes à utilização-tipo XII		
	Integrada em edifício		Ao ar livre
	Carga de incêndio modificada da UT XII	Número de pisos ocupados pela UT XII abaixo do plano de referência	Carga de incêndio modificada da UT XII
1. ^a	(*) ≤ 500 MJ/m ²	0	(*) ≤ 1 000 MJ/m ²
2. ^a	(*) ≤ 5 000 MJ/m ²	≤ 1	(*) ≤ 10 000 MJ/m ²
3. ^a	(*) ≤ 15 000 MJ/m ²	≤ 1	(*) ≤ 30 000 MJ/m ²
4. ^a	(*) > 15 000 MJ/m ²	> 1	(*) > 30 000 MJ/m ²

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

O Artigo 15 do Decreto-Lei indica que os elementos com função de suporte devem possuir uma resistência ao fogo padrão durante um determinado período de tempo, segundo o Quadro 2-3:

Quadro 2-3 – Resistência mínima ao fogo

Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios

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

Apesar do Artigo 15 do Decreto-Lei referir o “fogo padrão”, nada é referido quanto à utilização de outro tipo de curvas baseadas no desempenho. Aliás, é referido nesse artigo que a resistência deve assegurar a segurança mesmo durante o “rescaldo”, o que pressupõe que haja uma fase de arrefecimento, tal como nas curvas naturais, como se irá abordar com mais detalhe no subcapítulo 2.4. Até mesmo o Artigo 14 do mesmo Decreto-Lei, indica que devidamente justificado, o autor do projeto pode escolher outro tipo de abordagens. Ao contrário do que acontece na legislação portuguesa, os Eurocódigos abordam explicitamente as abordagens padrão e com base no desempenho, ficando na mão do projetista a escolha de método que mais lhe adequa.

Os Eurocódigos respetivos de cada tipo de material, tais como: o Eurocódigo 2 para as estruturas de betão, Eurocódigo 3 para as estruturas de aço, Eurocódigo 4 para estruturas mistas de aço-betão, o Eurocódigo 5 para estruturas de madeira, Eurocódigo 6 para as alvenarias e Eurocódigo 9 para o alumínio, todos têm uma parte relativa ao fogo, que é a parte 1-2 de cada um deles. Da mesma forma, o Eurocódigo 1 referente à quantificação das ações também tem a parte 1-2 relativa à quantificação da ação do fogo. As diferentes abordagens previstas da EN 1991-1-2 (Instituto Português da Qualidade, 2010) permitem que o projetista escolha entre uma opção conservativa mas mais prática, prescritiva (ISO 834), e uma abordagem com base no desempenho, mais complexa. Este tipo de abordagem avalia especificamente a ação térmica que poderá afetar o edifício em estudo com base em princípios físico-químicos, procurando avaliar cenários de incêndio realistas para a situação estudada, considerando as especificidades do próprio edifício e o tipo de atividade que aí se desenvolve. É uma abordagem mais minuciosa e tem em conta, por exemplo a quantidade de *sprinklers*, os meios de acesso, sistemas de deteção, etc, sendo determinada uma evolução do fogo muito mais próxima da realidade, que na fase de dimensionamento ao fogo, pode fazer diferença no peso total da estrutura a executar, e conseqüentemente tornar as estruturas metálicas mais competitivas, mesmo quando considerada a ação do fogo no seu dimensionamento.

Resumidamente, na abordagem padrão, a única variável é a temperatura crítica dos elementos estruturais segundo o incêndio pela ISO 834; na abordagem pelo desempenho, esse é apenas um dos parâmetros, sendo essencial considerar outros, tais como as condições de carregamento, o seu comportamento global enquanto estrutura, meios de combate ao incêndio, entre outros.

Esta preocupação tem sido global relativamente à exposição das estruturas metálicas a um incêndio. Isso tem levado a que haja uma maior vontade por parte de todos os intervenientes no setor das estruturas metálicas, desde o projetista ao fabricante, a que a ação do fogo não tenha os impactos nos custos globais das obras, como tem tido no passado recente. Essa união de esforços por várias entidades internacionais, levou a que cada vez sejam feitos mais estudos para tentar otimizar as estruturas metálicas quando sujeitos ao fogo, utilizando abordagens com base no desempenho que levam a soluções mais personalizadas para o edifício que se está a analisar, e conseqüentemente a soluções mais económicas. De acordo com dados da Tata Steel / BSCA, o custo da proteção ao fogo em estruturas metálicas baixou de 31% para 13% do seu custo total (Vila Real, 2021), no Reino Unido em 30 anos. Este número expressa bem a potencialidade económica que as abordagens pelo desempenho têm e aponta para o rumo que se deve ter nos anos pela frente, de forma a minimizar cada vez mais o efeito excessivamente penalizador que o dimensionamento ao fogo tem tido nas estruturas metálicas.

A EN 1993-1-1 permite 3 tipos de análise: análise global da estrutura, análise de parte da estrutura ou análise por elemento da estrutura. Dentro de cada uma destas análises, podem ser determinadas as secções a utilizar, usando valores tabelados, fórmulas simplificadas de verificação da resistência mecânica ou métodos avançados com recurso a programas com base no método dos elementos finitos, que exigem grande esforço de cálculo computacional, tendo em conta as propriedades dos gases e as transferências de massa e calor. Estes métodos são os menos apelativos para um projetista, uma vez que envolvem estudos muito morosos e detalhados. No entanto com o avanço da investigação nesta área, também começaram a surgir alguns softwares de cálculo, de fácil utilização, como por exemplo o *Elefir*.

Os cenários de cálculo são aplicados a um compartimento, ou seja, a um espaço confinado onde o fogo deflagra. A legislação portuguesa limita a dimensão desses compartimentos, tendo em conta, as categorias de risco, as utilizações-tipo, etc. Em cada compartimento podem ser definidas curvas de incêndio diferentes, o que leva a comportamentos da estrutura diferentes.

Aquando da verificação da segurança de uma estrutura à ação do fogo pode-se pensar em 3 perspetivas diferentes. Uma verificação no domínio do tempo, no domínio da resistência, ou ainda no domínio da temperatura, como é apresentado na Figura 2-8 Qualquer uma delas é válida e todas são previstas na EN 1993-1-2. Estas diversas formas de encarar o problema, apenas ajudam a visualizá-lo de maneiras diferentes, apesar da solução obtida ser igual de todas

as formas. Por exemplo, quando foi mencionado o Decreto-Lei nº 220/2008, o tempo mínimo que é determinado tendo em conta as características do edifício em estudo, corresponde a uma análise no domínio do tempo. Ou seja, o tempo requerido pode ser de 60 minutos, sendo que todos os cálculos têm de resultar num tempo em minutos que seja superior a esses 60 minutos requeridos, para que ao abrigo do Decreto-Lei nº 220/2008, o edifício cumpra a segurança contra incêndios. Da mesma forma, o raciocínio para os outros dois domínios são idênticos, apesar do domínio do tempo ser o mais usado.

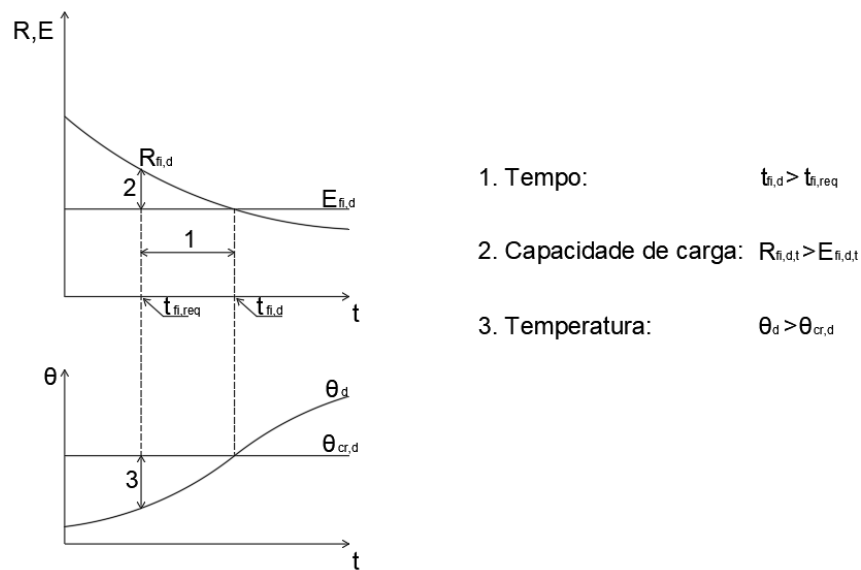


Figura 2-8 – Domínios de verificação para curvas nominais

2.4.3 Metodologia de cálculo

2.4.3.1 Combinação da ação em situação de incêndio

As ações em situação de incêndio são as mesmas usadas no dimensionamento de estruturas à temperatura ambiente; por isso nesta fase já é necessário ter determinado as ações permanentes (pesos próprios) e as ações variáveis (sobrecarga de utilização, vento, neve, temperatura, etc).

Na combinação da ação do fogo com as outras ações, a EN 1990 encara a combinação em que entra o fogo, como uma combinação acidental, em que a ação do fogo deve atuar simultaneamente com as outras ações que sejam plausíveis de ocorrer nesse período de incêndio, de acordo com a expressão:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P + "A_d + "(\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1})Q_{k,1} + " \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

Como é possível perceber pela expressão anterior, o uso do valor frequente ($\psi_{1,i}$) ou o valor quase permanente ($\psi_{2,i}$) da ação variável base fica em aberto. No entanto, o Anexo Nacional da EN 1991-1-2 recomenda que deve ser utilizado o valor frequente. Por isso, para Portugal, a combinação toma o seguinte formato:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + "P" + "A_d" + "\psi_{1,1} Q_{k,1}" + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5)$$

Os métodos simplificados da EN 1991-1-2 não requerem a parcela A_d (ações indiretas devido à situação accidental). Os valores dos coeficientes frequentes e quase-permanentes são fornecidos na EN 1990 e apresentados na Quadro 2-4.

Quadro 2-4 – Coeficientes de combinação de acordo com a EN 1990

Ação	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)		
Categoria A: zonas de habitação	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN $<$ peso dos veículos ≤ 160 kN	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ¹⁾		
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,5	0
<i>NOTA: Os valores de ψ poderão ser definidos no Anexo Nacional. 1) Para os países não mencionados, considerar as condições locais relevantes.</i>		

Os valores quase permanentes são nulos em alguns casos, nomeadamente no caso da ação do vento. Isto significa, que para ação accidental devido ao fogo, a ação do vento nunca seria considerada. Consequentemente, ao não existirem forças horizontais, especialmente numa estrutura metálica, traduzir-se-ia em contraventamentos com esforços quase insignificantes, dispensando a proteção passiva nesses mesmo elementos, o que poderá ser pouco prudente, logo a evitar. Em Portugal, uma vez que se utiliza o valor frequente da ação variável, não há valores nulos (à exceção das coberturas do tipo H). Não deve ser considerado nenhum decréscimo das sobrecargas devido à combustão. Por outro lado, em caso de neve deve ser avaliada a situação em que a neve derrete. Uma outra nota, para ações resultantes de operações

industriais, tais como utilização de empilhadores, não devem ser consideradas em situação de incêndio.

Alternativamente, a EN 1991-1-2 adota um valor η_{fi} de redução de carga relativamente à situação de carregamento para a temperatura ambiente dada pelas seguintes equações:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \psi_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (6)$$

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (7)$$

Simplificadamente, a EN 1993-1-2 recomenda a utilização de um valor de 0,65 (valor conservador), à exceção de sobrecargas de utilização da zona E. Habitualmente, este valor é utilizado em situações que o projetista que desenvolve o projeto de incêndio, não é o mesmo que desenvolve o projeto à temperatura ambiente, uma vez que o projeto de fogo foi adjudicado posteriormente ao projeto de estabilidade. Apesar de ser um procedimento que não é recomendável, o desenvolvimento do projeto por parte de dois projetistas diferentes acontece regularmente. O parâmetro de redução η_{fi} permite que o 2º projetista aproveite os esforços do 1ª projetista, afetando-os com este valor. Assim evita-se o cálculo de todos os esforços da estrutura para a combinação acidental de incêndio, apesar de conduzir a resultados mais conservadores.

2.4.3.2 Incêndio natural

Um incêndio ocorre quando se reúnem 3 elementos: uma fonte de calor, o combustível e o comburente. Quando existe uma mistura entre combustível e oxigénio (o comburente), a uma dada temperatura dá-se a combustão. Tipicamente, uma curva de incêndio reproduz a evolução da temperatura ao longo do tempo, e é dividida em 4 fases (ver Figura 2-9):

- fase de ignição, em que as temperaturas ainda estão relativamente baixas, sem afetar o comportamento mecânico da estrutura;
- fase de propagação, atinge-se o *flashover*. Nesta fase, a temperatura aumenta muito rapidamente podendo já ultrapassar os 600 °C;
- fase de desenvolvimento pleno, onde se queima todo o material combustível disponível, mantendo-se a temperatura aproximadamente constante;
- fase de arrefecimento, onde se dá a extinção do incêndio, com as temperaturas a baixar consideravelmente, quer pelo fim do combustível, quer pela intervenção das equipas de socorro.

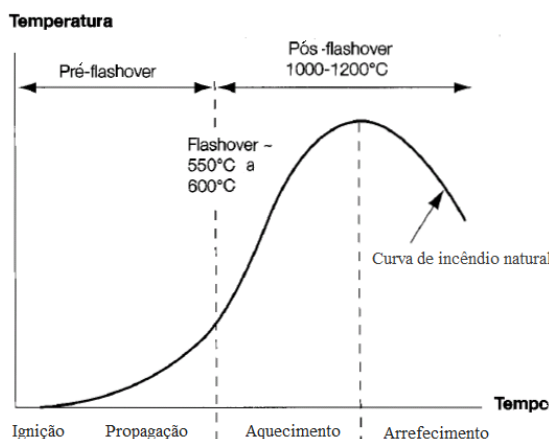


Figura 2-9 – Curva natural de incêndio

O oxigénio tem um papel fundamental durante um incêndio, uma vez que não há combustão sem oxigénio. O incêndio pode-se extinguir, quer pelo esgotamento da quantidade de material combustível disponível, quer pela quantidade de oxigénio disponível, sendo controlado pela ventilação.

Na existência de meios preventivos de incêndio como *sprinklers*, sistemas de alarme e deteção ou meios de combate a incêndio, as curvas de incêndio podem ter um comportamento completamente diferente, não atingindo altas temperaturas e por um menor período de tempo, não comprometendo tanto a resistência da estrutura.

A simulação de um incêndio é algo complexa, uma vez que existem muitas variáveis a ter em conta, em geral apresentando um comportamento não linear. Hoje em dia, já existem muitos trabalhos de investigação com casos reais que demonstram que as abordagens permitidas pela EN 1991-1-2 são fiáveis, e que garantem que o cenário de incêndio projetado é aproximado de uma hipotética situação real de incêndio. A proximidade do modelo com a realidade é tanto mais fidedigna, quanto a complexidade do modelo adotado, tal como foi falado anteriormente.

2.4.3.3 Curvas apresentadas pela EN 1991-1-2

A EN 1991-1-2 fornece aos projetistas curvas nominais e curvas de incêndio natural, para representar o desenvolvimento do incêndio ao longo do tempo. As curvas de incêndio natural já envolvem alguma densidade de cálculo, quando comparadas com as nominais, mas que produzem resultados mais próximos da realidade.

Essas curvas nominais são curvas simplificadas, definidas apenas com uma expressão matemática, onde se determina temperatura em ordem ao tempo (ver Figura 2-10). A evolução

ao longo do tempo não tem em conta fatores como a dimensão do compartimento, densidade carga, etc. A EN 1991-1-2 fornece a seguinte equação para a curva de incêndio padrão ISO 834:

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

Também para elementos exteriores:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (9)$$

E para a curva de incêndios de hidrocarbonetos:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10)$$

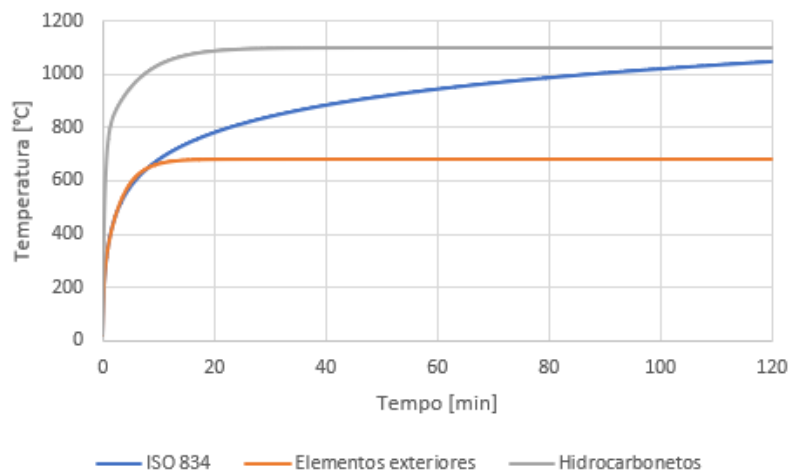


Figura 2-10 – Curvas padrão de acordo com o EN 1991-1-2

As curvas reproduzidas pelas Equações (8), (9) e (10) são recomendadas por quase todos os regulamentos de segurança contra incêndios na maioria dos países europeus.

As curvas de incêndio natural reproduzem melhor o comportamento real do incêndio, uma vez que já tem em conta uma vasta gama de fatores, que moldam a curva às características do edifício em análise. Dentro das curvas de incêndio natural, a EN 1991-1-2 prevê que possam ser utilizadas curvas paramétricas para um compartimento, ou curvas para um incêndio localizado, sendo ambas abordagens simplificadas. Se for pretendido ir mais ao detalhe, a EN 1991-1-2 permite a utilização de modelos de elementos finitos com recurso a programas computacionais, como por exemplo o *CFD – Computational Fluid Dynamics*. A Figura 2-11 apresenta esquematicamente, todos os métodos de cálculo da ação do fogo previstos na EN 1991-1-2.

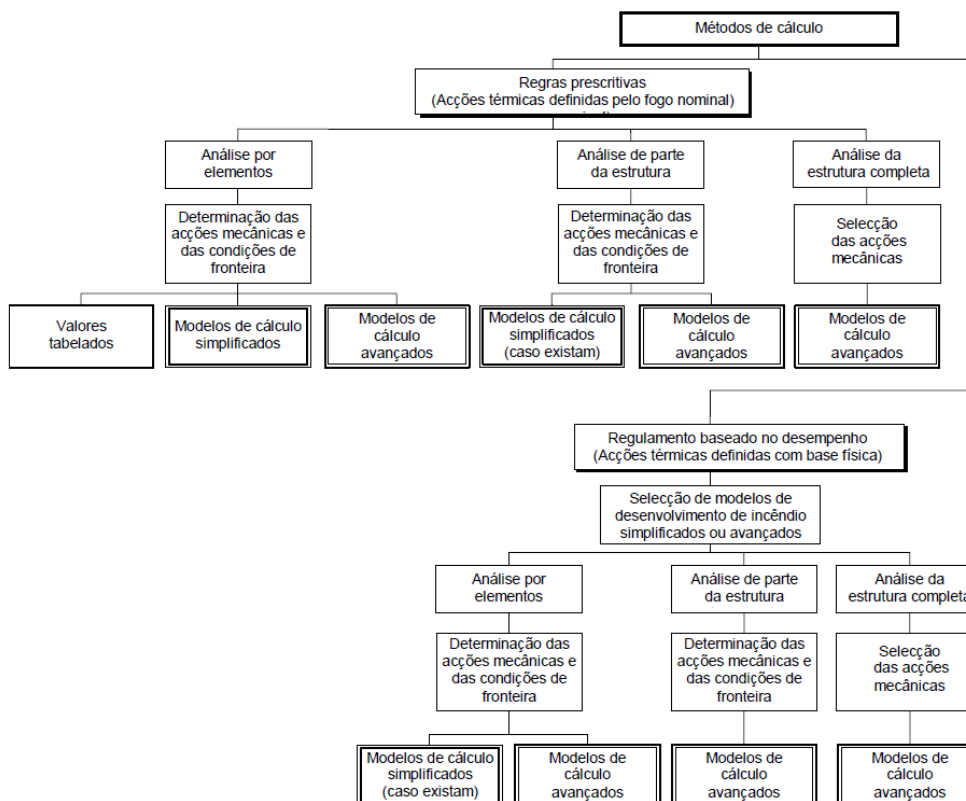


Figura 2-11 – Métodos de cálculo da EN 1991-1-2

As curvas paramétricas de incêndio estão definidas no Anexo A da EN 1991-1-2 dependendo dos seguintes fatores:

- densidade carga de incêndio;
- ventilação do espaço, tendo em conta as dimensões do edifício;
- propriedades das paredes envolventes.

Estas curvas paramétricas distinguem-se essencialmente das curvas padrão por incluírem uma fase de arrefecimento. A metodologia apresentada define, em primeiro lugar, o domínio de aplicação, sendo estas curvas válidas para compartimentos inferiores a 500 m², com uma altura máxima de 4 m, sem aberturas no tecto e com a carga de incêndio disponível a ser toda consumida.

Com já foi referido, as curvas paramétricas caracterizam-se por ter uma fase de aquecimento; e depois de ser atingida uma temperatura máxima, inicia-se uma fase de arrefecimento até à extinção do incêndio. A fase de aquecimento é dada pela seguinte expressão:

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad [^{\circ}C] \quad (11)$$

A curva de aquecimento depende dos materiais que envolvem o compartimento onde se desenvolve o incêndio e das suas respetivas características, como por exemplo, a massa volúmica, a condutibilidade térmica ou o calor específico dos materiais das paredes e do tecto (alguns exemplos no Quadro 2-5). Se existir uma envolvente com vários tipos de materiais, a EN 1991-1-2 também prevê expressões que tenham em conta esse facto.

Quadro 2-5 – Propriedades térmicas dos materiais de construção

Material	Massa volúmica ρ [kg/m ³]	Condutibilidade térmica λ [W/mK]	Calor específico c [J/kgK]	Coefficiente b [J/m ² s ^{1/2} K]
Tijolos pesados	2000	1,2	1000	1549
Tijolos leves perfurados	700	0,15	840	297
Tijolos normais	1600	0,7	840	970
Betão leve	1600	0,8	840	1037
Betão normal	2300	1,6	1000	1918
Placas rígidas de gesso	900	0,25	1000	474
Acabamento de gesso	1150	0,485	1000	747
Aço carbono	7850	45	600	14559
Granito	2600	2,8	1000	2698
Lã de vidro	60	0,037	1030	48
Lã de rocha	60	0,037	1030	48
Madeira pesada	720	0,2	1880	520
Madeira normal	450	0,1	1113	224

A curva paramétrica também tem em conta a existência ou não de aberturas verticais. O fator de abertura (O) demonstra ser importante na aplicabilidade das curvas paramétricas em pavilhões industriais, uma vez que este tipo de construção tende a ter poucas aberturas, baixando muito este valor, ficando por vezes abaixo do limite regulamentar:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [\text{m}^{1/2}] \quad \text{entre } 0,02 \text{ e } 0,20 \quad (12)$$

Em que h_{eq} é a média ponderada das alturas de todas as aberturas verticais e A_t é a área total da superfície envolvente.

A temperatura máxima da curva (t_{max}) é obtida através da seguinte expressão:

$$t_{max} = \max[(0,2 \times 10^{-3} q_{t,d} / O); t_{lim}] \quad [\text{h}] \quad (13)$$

Em que $q_{t,d}$ é o valor de cálculo da densidade carga de incêndio referida à área A_i . E também depende do tempo limite (t_{lim}) que é determinado sabendo a velocidade de propagação do incêndio, que por sua vez, é determinado com o auxílio do Quadro 2-6.

Quadro 2-6 – Velocidade de propagação de incêndios para diferentes ocupações

Ocupação	Velocidade de propagação de incêndio	t_{lim} [min]
Habitação	Média	20
Hospital (quarto)	Média	20
Hotel (quarto)	Média	20
Biblioteca	Rápida	15
Escritório	Média	20
Sala de aulas em escolas	Média	20
Centro comercial	Rápida	15
Teatro (cinema)	Rápida	15
Transportes (espaço público)	Lenta	25

Já na fase de arrefecimento, a curva de incêndio é dada pela expressão que se adequa ao intervalo do tempo máximo (t_{max}^*):

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{para } t_{max}^* \leq 0,5 \quad (14)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{para } 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (15)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad [^\circ\text{C}] \quad \text{para } t_{max}^* \geq 2 \quad (16)$$

Utilizando a expressão aplicável, determina-se o tempo necessário para chegar à temperatura de 20 °C, ou seja, o tempo de arrefecimento. Se esse tempo for somado ao tempo de aquecimento (até atingir a temperatura máxima), obtém-se o tempo total de incêndio.

2.4.3.4 Densidade de carga de incêndio

O conhecimento do recheio do edifício, ainda em fase de projeto, é essencial para determinar a densidade de carga de incêndio.

Existem duas formas de determinar a densidade de carga de incêndio: através dos dados que estão disponíveis na legislação portuguesa, ou através da metodologia de cálculo prescrita na EN 1991-1-2. A EN 1991-1-2 fornece alguns valores para casos mais comuns ($q_{f,k}$) como

demonstra o Quadro 2-7, tendo de se interpolar valores caso a ocupação não seja nenhuma das indicadas. Já a legislação portuguesa, mais concretamente no Despacho nº 2074/2009 (Autoridade Nacional da proteção civil, 2009), fornece mais valores, sendo mais abrangente nas opções apresentadas (ver Quadro 2-8).

Quadro 2-7 – Densidade de carga de incêndio por ocupação – EN 1991-1-2

Ocupação	$q_{f,k}$ [MJ/m ²]
Habitação	948
Hospital (quarto)	280
Hotel (quarto)	377
Biblioteca	1824
Escritório	511
Sala de aulas de uma escola	347
Centro comercial	730
Teatro (cinema)	365
Transporte (espaço público)	122

Quadro 2-8 – Densidade de carga de incêndio - Excerto do Despacho nº 2074/2009

Actividade	Fabricação e reparação		Armazenamento	
	q_u (MJ/m ²)	R_u	q_u (MJ/m ²)	R_u
Discos	600	Médio		
Drogarias	1 000	Alto	800	Médio
Edifícios frigoríficos	2 000	Alto		
Electricidade, armazém de materiais de			400	Baixo
Electricidade, oficina de	600	Médio		
Electrodomésticos	300	Médio	200	Baixo
Embalagem de material impresso	1 700	Alto		
Embalagem de mercadorias combustíveis	600	Médio		
Embalagem de mercadorias incombustíveis	400	Baixo		
Embalagem de produtos alimentares	800	Médio		
Embalagem de têxteis	600	Médio		
Encadernação	1 000	Alto		
Envernizamento	80	Médio		
Envernizamento de móveis	200	Médio		
Envernizamento de papel	80	Médio		
Equipamento de frio	1 000	Alto	300	Baixo

A densidade deve ser afetada por mais parâmetros, que têm influência no desenvolvimento do incêndio, podendo em certos casos diminuir o impacto que esta densidade de carga teria na curva de incêndio, através da seguinte expressão:

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

Em que m é o fator de combustão, δ_{q1} é um fator parcial para ter em conta o risco de ativação de incêndio em função da dimensão do compartimento, δ_{q2} é outro fator mas em função do tipo de ocupação, δ_n são um conjunto de fatores em função das medidas ativas de proteção. Ou seja, a densidade de carga pode ser calculada, multiplicando por fatores que minoram ou majoram essa densidade, de acordo com as seguintes características:

- dimensão do compartimento (ver Quadro 2-9);
- tipo de ocupação (ver Quadro 2-9);

Quadro 2-9 – Parâmetros relativos à dimensão e utilização do edifício - EN 1991-1-2

Área do pavimento do compartimento A_f [m ²]	Perigo de activação de incêndio δ_{q1}	Perigo de activação de incêndio δ_{q2}	Exemplos de tipo de ocupação
25	1,10	0,78	Galeria de arte, museu, piscina
250	1,50	1,00	Escritório, residência, hotel, indústria do papel
2500	1,90	1,22	Fábrica de máquinas e motores
5000	2,00	1,44	Laboratório químico, oficina de pintura
10 000	2,13	1,66	Fábrica de pirotecnia ou tintas

- medidas ativas na proteção contra incêndios (ver Quadro 2-10).

Quadro 2-10 – Parâmetros relativos às medidas de proteção ativas – EN 1991-1-2

δ_{n1} Função de medidas activas de combate a incêndio									
Extinção automática de incêndio		Detecção automática de incêndio			Extinção manual de incêndio				
Sistema automático de extinção com água	Redes independentes de fornecimento de água 0 1 2	Detecção e alarme automáticos de incêndio		Transmissão automática de alarme aos bombeiros	Bombeiros no local	Bombeiros fora do local	Vias de acesso seguras	Dispositivos de combate a incêndios	Sistema de exaustão de fumos
		pele calor	pele fumo						
δ_{n1}	δ_{n2}	δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0 0,87 0,7	0,87 ou 0,73		0,87	0,61 ou 0,78		0,9 ou 1 ou 1,5	1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5

O Anexo E da EN 1991-1-2, num outro tipo de abordagem, também pode ser utilizado para a determinação da densidade de carga de incêndio, de forma mais exata, com base no potencial calorífico dos materiais.

Apesar de todo o procedimento de cálculo apresentado anteriormente, o Anexo Nacional da EN 1991-1-2, indica que a expressão para a determinação da carga de incêndio, deve ser alterada para:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (18)$$

O Anexo Nacional não permite que sejam utilizados estes fatores de minoração e majoração, a não ser que sejam devidamente justificados com análises de risco e exemplos práticos que comprovem as opções tomadas. Por isso, a densidade de carga de incêndio obtida da legislação portuguesa é uma opção válida, fiável e de fácil utilização, já que utiliza valores com base no historial estatístico de Portugal.

2.4.3.5 Propriedades térmicas e mecânicas do aço

Após a análise da ação do fogo, é fundamental perceber qual é o comportamento do aço quando sujeito a essa ação. Além das extensões que o aço apresenta quando sujeito a temperaturas elevadas, o fogo afeta o aço, essencialmente em dois parâmetros, no que respeito à térmica:

- calor específico (ver Figura 2-12);

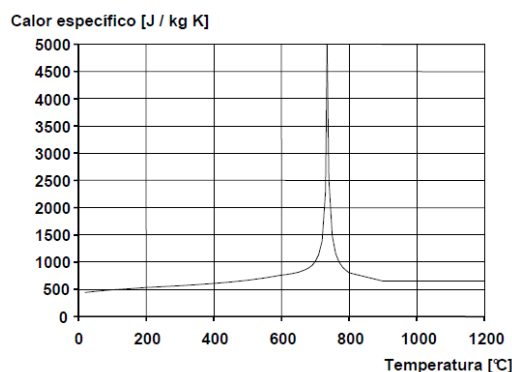


Figura 2-12 – Evolução do calor específico com a temperatura

- condutibilidade térmica (ver Figura 2-13).

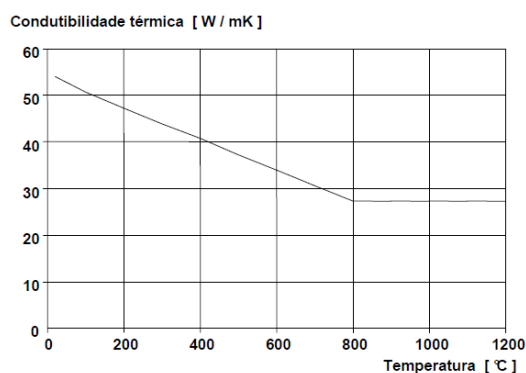


Figura 2-13 – Evolução da condutibilidade térmica com a temperatura

Já do ponto de vista mecânico, o aço apresenta uma degradação das suas propriedades com o aumento da temperatura: na tensão limite de proporcionalidade, na tensão de cedência e no módulo de Young, como é apresentado na Figura 2-14.

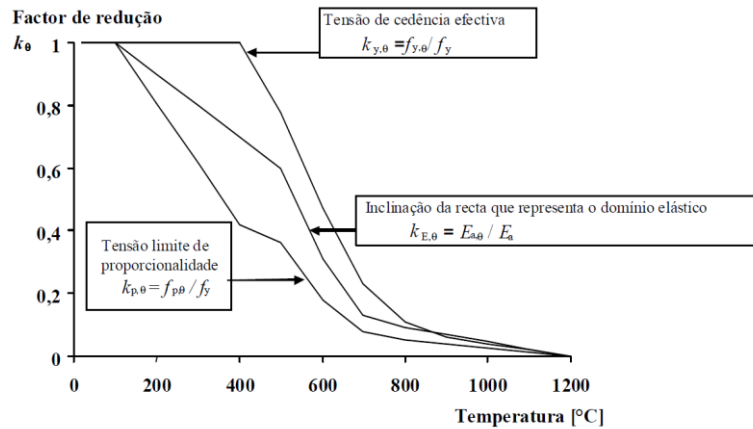


Figura 2-14 – Evolução das propriedades mecânicas com a temperatura

Como exemplo, o aço a 700 °C tem apenas 23% da resistência que apresenta à temperatura normal. Assim se percebe o impacto do fogo no dimensionamento de estruturas metálicas.

2.4.3.6 Fator de massividade

A massividade é um parâmetro geométrico relevante no cálculo da evolução das temperaturas nas secções metálicas. É definida como a relação entre o perímetro e a área da secção. Existe apenas uma particularidade na determinação deste fator, que depende do número de faces expostas ao fogo, tal como demonstra a Figura 2-15.

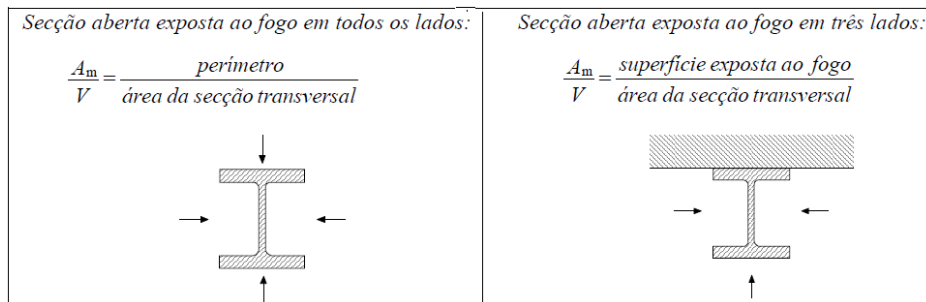


Figura 2-15 – Massividade para perfis abertos

Quanto menor a massividade, menor a proteção que terá de ser aplicada para se atingir a resistência ao fogo pretendida. É possível perceber isso através das tabelas dos fornecedores de

proteção passiva (intumescentes, por exemplo), em que para a mesma temperatura crítica são indicadas espessuras superiores para perfis com maior massividade.

De referir, que a evolução da temperatura também pode depender do fator de sombra, que pode ser igual ou inferior ao valor de 1, especialmente em perfis abertos, onde se pode ter em conta o resguardo que algumas zonas da secção têm relativamente a outras mais expostas (ver Figura 2-16).

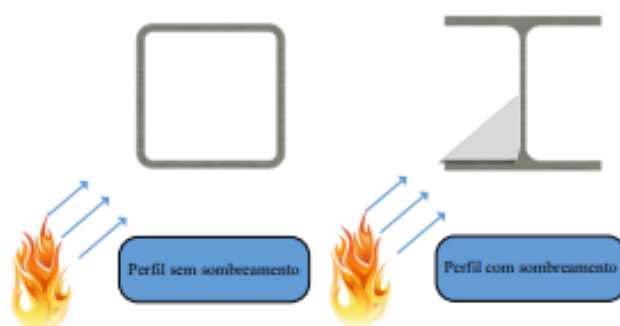


Figura 2-16 – Fator de sombra

2.4.3.7 Proteção passiva

A proteção passiva não necessita de nenhuma ativação para que se desenvolva essa proteção. Em estruturas metálicas, os sistemas de proteção mais adotados são as tintas intumescentes, os materiais projetados e placas rígidas de gesso. A escolha de um tipo de proteção depende essencialmente de fatores económicos e também arquitetónicos.

A tinta intumescente é uma camada de tinta, habitualmente depois de uma demão de primário e antes de uma de acabamento (ver Figura 2-17), que pode ser aplicada em fábrica ou em obra.

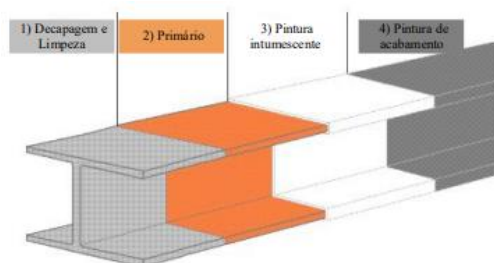


Figura 2-17 – Esquema de pintura com intumescente

Este sistema, quando sujeito a altas temperaturas expande, formando uma camada muito mais espessa que a inicial, de isolamento térmico da superfície da secção metálica, protegendo-a

contra esse mesmo aumento de temperatura, durante algum tempo, como demonstra a Figura 2-18.

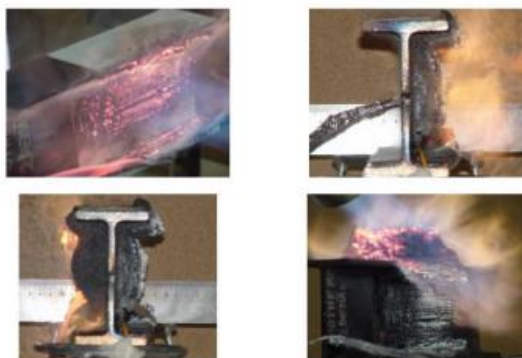


Figura 2-18 – Modo de atuação da tinta intumescente

A tinta intumescente confere às peças metálicas um acabamento, que as outras soluções não conseguem oferecer. No entanto, é uma solução que pode ser muito dispendiosa, se o dimensionamento ao fogo for muito conservador, indo ao encontro a um dos objetivos desta tese.

Alternativamente, existem os materiais projetados, que são aplicados em obra e que garantem uma boa proteção térmica aos perfis metálicos (ver Figura 2-19). Estes materiais podem variar entre lã de rocha, a fibra de vidro, agregados minerais (vermiculite e perlite) e os ligantes, como o cimento e o gesso. Esta é uma solução mais barata, mas muito desagradável visualmente, obrigando a que esses perfis depois tenham de “escondidos” com um revestimento secundário, subindo o custo da solução no seu global.



Figura 2-19 – Proteção com materiais projetados

Por último, existem também as placas rígidas de gesso cartonado, que envolvem as peças em forma de caixão, retardando o aquecimento do perfil metálico, conforme a Figura 2-20. Esta solução não é de tão fácil aplicação, por isso em pavilhões industriais não é tão adotada.



Figura 2-20 – Proteção com placas rígidas em forma de caixão

A decisão do tipo de proteção aplicado num edifício fica na mão dos donos de obra / arquitetos, escolhendo entre uma proteção que pode ser mais cara, mas esteticamente fica perfeita (com recurso a tintas intumescentes), ou outro tipo de proteção que pode ser mais barata, mas visualmente deixa muito a desejar (B. M. S. da Silva, 2016).

2.4.3.8 Dimensionamento pela EN 1993-1-2

À semelhança do que acontece nas verificações de segurança para a temperatura ambiente, para o fogo as verificações têm de ser efetuadas sobre a resistência e as deformações dos elementos metálicos. No entanto, se as deformações puderem ser acomodadas pelo material de proteção sem o comprometer, esta condição fica automaticamente verificada. Por isso, a verificação ao fogo, no domínio da resistência, reduz-se à verificação do colapso da estrutura num dado instante t , através da seguinte expressão:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (19)$$

Em que $E_{fi,d}$ é o valor de cálculo do efeito das ações em situação de incêndio e $R_{fi,d,t}$ é o valor de cálculo da resistência correspondente também em situação de incêndio.

A metodologia de cálculo proposta pela EN 1993-1-2 é muito semelhante ao que é proposto na EN 1993-1-1 para a temperatura ambiente. Ou seja, no domínio da resistência, as verificações para esforços axiais, transversos e momentos fletores usam a mesma formulação, com a particularidade de que essas expressões são afetadas por um fator de minoração que resulta da perda de propriedade mecânicas devido ao aumento da temperatura da secção em análise. Em suma, são verificadas as classes da secção, os elementos tracionados, elementos comprimidos,

vigas sujeitas a momento flector e elementos sujeitos a flexão composta, tal como era feito de acordo com a EN 1991-1-2. No entanto, e continuando o paralelismo com a EN 1993-1-1, a EN 1993-1-2 não indica nenhuma metodologia de cálculo sobre a encurvadura da alma por esforço transversal, flexão desviada, torção, entre outros. Não estando descrito nada sobre estas verificações, pressupõe-se que as fórmulas indicadas na EN 1993-1-1 podem continuar a ser aplicadas, tendo em conta a degradação da resistência para elevadas temperaturas.

2.4.3.9 Temperatura crítica

A temperatura crítica ($\theta_{a,cr}$) corresponde à temperatura em que um elemento metálico colapsa, quando sujeito à ação do fogo. Só aplicável quando se admite que a temperatura é uniforme em toda a secção transversal, como acontece nas estruturas metálicas, que devido à elevada condutibilidade térmica do aço, aquece quase uniformemente toda a secção transversal. Já em secções de betão, isto já não acontece, existindo um gradiente térmico entre a periferia e núcleo central, por isso o conceito da temperatura crítica, já não é usado.

Em estruturas metálicas, na aplicação de proteção passiva, a temperatura crítica é um parâmetro essencial para a determinação da espessura do material de proteção, através das tabelas dos fornecedores (método mais expedito sem ter em conta o fator de sombra), ou através de cálculos analíticos, de acordo com as propriedades térmicas do material de proteção. Quanto maior é a temperatura crítica, menos gravoso é o comportamento ao fogo desse elemento metálico, e conseqüentemente menor será a espessura de proteção passiva. Ou seja, se dois elementos idênticos estão sujeitos ao mesmo incêndio, mas sobre eles têm carregamentos diferentes, a temperatura crítica será menor no elemento mais carregado, o que leva a uma maior proteção nesse elemento.

O Anexo Nacional da EN 1993-1-2, prevê que em caso de omissão do cálculo ao fogo sejam admitidas as temperaturas críticas de 500 °C para a generalidade dos casos e em particular para elementos onde possam ocorrer fenómenos de instabilidade. Infelizmente, este é um método muitas vezes utilizado, já que grande parte dos projetos de estabilidade não englobam a análise da estrutura sob a ação do fogo, e de forma conservadora adotam esta temperatura crítica, conduzindo a espessuras de material de proteção bastante elevadas, encarecendo demasiado a solução estrutural em aço.

A EN 1993-1-2 fornece uma expressão para a determinação da temperatura crítica para elementos tracionados ou vigas que não sejam condicionados por fenómenos de instabilidade:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (20)$$

Esta temperatura depende exclusivamente do grau de utilização (μ_0):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (21)$$

Em que $R_{fi,d,0}$ corresponde ao valor de cálculo da resistência correspondente também em situação de incêndio para o tempo 0. Quanto maior é a reserva de resistência, maior é a temperatura crítica. Para elementos sujeitos a fenómenos de instabilidade, este cálculo já não é direto, uma vez que a tensão de cedência deixa de ser proporcional à resistência (devido aos parâmetros de redução devido às encurvaduras), e torna este cálculo iterativo.

2.5 Sustentabilidade de um pavilhão metálico

O setor da construção é um dos motores mais importantes da economia mundial, que traz grandes benefícios económicos e sociais, mas também tem grande relevância nos impactos ambientais a nível global. O setor é responsável por grande parte dos consumos de recursos naturais, com uma grande quantidade de desperdícios e um grande emissor de gases nocivos para a atmosfera. Mediante este problema, é imperativo adotar uma construção sustentável que se divide em 3 dimensões:

- ambiental – proteção de recursos, dos ecossistemas e do bem-estar humano;
- económica – custos relativos ao ciclo de vida da estrutura, desde a extração, produção, construção, utilização e fim de vida;
- social – influência na saúde, segurança e conforto dos utilizadores do edifício.

A construção sustentável segue algumas linhas orientadoras, tais como:

- a reutilização de produtos ou edifícios em fim de vida, para diminuir os impactes ambientais;
- a pré-fabricação de produtos, otimizando o processo de produção, tornando-o mais sustentável;
- a redução do desperdício e emissão de gases, nomeadamente no setor da construção;
- o uso de materiais “verdes” e ecológicos;
- a eficiência energética do edifício, como por exemplo a redução de perdas de calor do edifício, meios ecológicos no consumo e produção de energia para diminuir o consumo de energia durante a sua vida útil;
- construções rápidas de erguer em obra, mais leves, com menor volume de fundações, com espaços que se podem adaptar ao longo dos tempos (construção modular).

O desafio da sustentabilidade consiste na satisfação das necessidades da sociedade, sem comprometer as gerações vindouras (López Ruiz et al., 2020). Para dar resposta a esta problemática, foram criadas ferramentas para quantificar o desempenho sustentável de um produto ou de um edifício nas várias etapas da sua vida, através de uma avaliação multidisciplinar que recolhe indicadores de várias áreas. A Análise de Ciclo de Vida é uma dessas ferramentas que tem tido grande receptividade internacional, para avaliar o desempenho sustentável de um produto ou edifício, quantificando os recursos, emissões e outros impactes que o edifício tem ao longo de todas as fases, tais como:

- extração de materiais e combustíveis utilizados;
- fabricação de componentes de construção;
- transporte materiais e componentes;
- utilização (consumo de energia, manutenção e reparação e renovação);
- demolição, reciclagem ou reutilização do produto ou edifício no final da sua vida útil.

A Análise de Ciclo de Vida pode ser aplicada com vários intuitos, tais como: identificar e melhorar aspetos de produtos durante o seu ciclo de vida; executar um planeamento estratégico por parte de organizações governamentais e não governamentais, para a tomada de decisões e políticas sobre a indústria; seleccionar indicadores que podem ser relevantes na aferição do desempenho ambiental de um produto; fazer marketing de um produto “amigo do ambiente”.

E também pode ser enquadrada de duas formas diferentes, consoante a longevidade da análise. Ou seja, existe a análise “*cradle to gate*” que apenas tem em conta as fases da extração da matéria-prima até ao fim do processo de fabrico, assim como também existe a análise “*cradle to grave*” que engloba todas as fases do produto ou edifício até ao fim da sua vida.

Na atualidade, já existe alguma regulamentação internacional para executar uma análise de sustentabilidade de um produto ou edifício, quer na vertente ambiental, ou económica, ou ainda social, como por exemplo a ISO 14040, ISO 15686, ou a EN 15643-3, respetivamente. Em Portugal, esta regulamentação não é obrigatória legalmente.

A metodologia associada à Análise de Ciclo de Vida tem a representação esquemática apresentada na Figura 2-21.

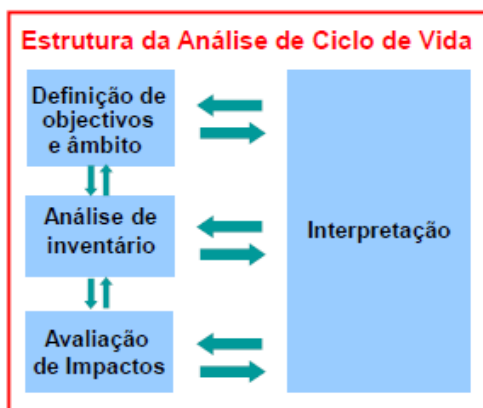


Figura 2-21 – Estrutura de Análise de Ciclo de Vida

Em primeiro lugar, define-se o objetivo e o âmbito da análise, devendo clarificar o grau de precisão e fiabilidade da comparação dos produtos e em que unidade de medida equivalente irá ser adotada para executar essa mesma comparação. Em segundo lugar, procede-se a uma análise de inventário, de forma a quantificar todo o fluxo de energia e materiais para cada uma das etapas da sua vida. Em terceiro e último, relacionar o inventário determinado anteriormente com indicadores ambientais, nomeadamente o potencial de aquecimento global, toxicidade humana e destruição de recursos (Roma, 2012)

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Apresentação da solução em betão

O edifício objeto deste caso de estudo tem as dimensões em planta indicadas na Figura 3-1.

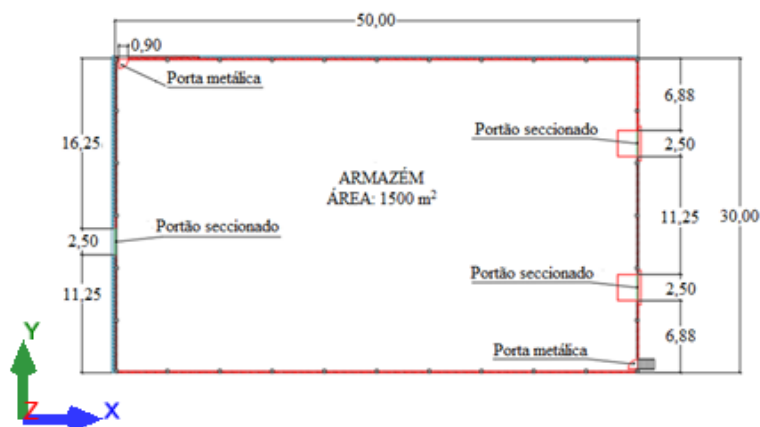


Figura 3-1 – Planta do edifício

O corte transversal do edifício é representado na Figura 3-2:

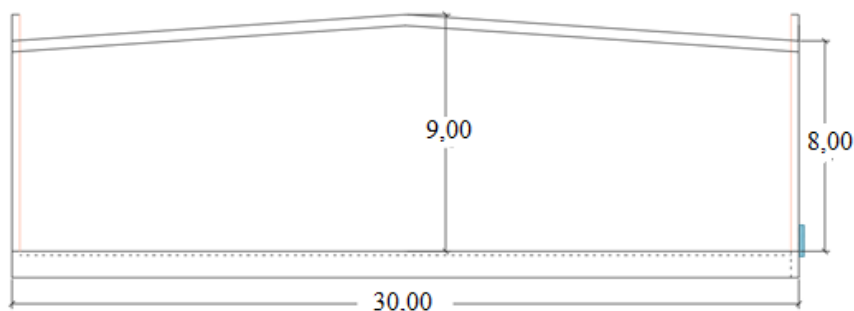


Figura 3-2 – Corte transversal do edifício

Este é um edifício com 50 m de comprimento e 30 m de largura, perfazendo uma área total de 1500 m². Tem uma cobertura de duas vertentes, sendo que os pilares laterais têm 8 m de altura e cerca de 9 m na cumeeira, com uma platibanda de 1 m. Isto faz com que a inclinação das duas

vertentes seja de $3,81^\circ$, valor inferior à inclinação mínima para este tipo de edifícios, podendo originar problemas no escoamento das águas pluviais, e consequentemente infiltrações.

A estrutura principal foi executada com peças em betão pré-fabricado na sua estrutura principal (pilares e vigas). Os perfis de suporte da cobertura em painel sandwich são em perfis I pré-fabricados de betão (ver exemplo na Figura 3-3). Nas paredes foram colocados painéis de betão pré-fabricado, não havendo necessidade de painel sandwich nas fachadas. Esta solução considerou afastamentos entre pórticos de 8 m e os pilares de empena afastados de 7,5 m.



Figura 3-3 – Exemplo de um edifício executado com pré-fabricados de betão

O edifício está localizado em Peniche e trata-se de um armazém de embalagens da indústria alimentar. Relativamente à segurança contra incêndios da estrutura principal foi apresentado um requisito R90. Os custos desta solução serão apresentados no subcapítulo 3.7.

O desafio desta dissertação passa por encontrar uma alternativa em aço que consiga ser mais económica que a solução de betão pré-fabricado que foi apresentada. Tem particular relevância neste caso de estudo, o requisito R90 ao incêndio porque *à priori* vai condicionar bastante a competitividade da solução estrutural em aço.

3.2 Conceção da alternativa em aço

A conceção estrutural adotada teve por base o binómio eficiência estrutural e solução arquitetónica apresentada, isto é, procurou-se obter a estrutura mais económica possível que cumpra os requisitos que a regulamentação vigente preconiza, do mesmo modo que materializa a solução arquitetónica pretendida. No entanto, no que toca às fachadas estas foram alteradas para painel sandwich, tal como a cobertura, em alternativa aos painéis de betão pré-fabricado usados na solução em betão. Apresentando uma solução em aço, vulgarmente também é

aconselhada a mudança para este tipo de revestimento, algo que os donos de obra / arquitetos não se opõem, em grande parte dos casos.

A estrutura em aço concebida é uma estrutura porticada com afastamentos de 6,25 m entre pórticos e de 7,5 m nos pilares de empena. Foi considerado um sistema de contraventamentos no topo dos pilares e diagonais em dois vãos da cobertura e fachada do edifício. A estrutura principal foi modelada usando o *Robot Structural Analysis* conforme a Figura 3-4. As madres (estrutura secundária) tanto da cobertura, como da fachada são em perfis galvanizados enformados a frio em forma de C.

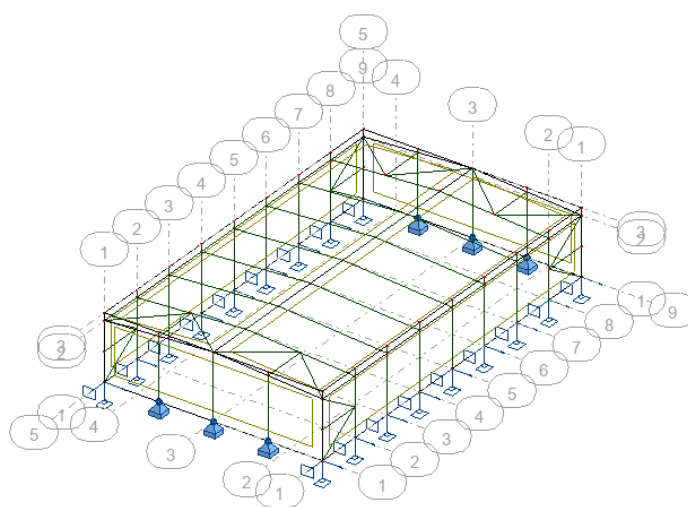


Figura 3-4 – Modelo estrutural 3D

Relativamente às condições de apoio, as bases dos pilares foram consideradas como rígidas, à exceção das bases dos pilares de empena. Já as ligações pilar-viga e cumeeira foram igualmente consideradas rígidas. As ligações dos contraventamentos são todas articuladas, de modo a transmitirem esforço axial unicamente.

Para efeitos de cálculo, nomeadamente na determinação dos comprimentos de encurvadura, foi considerado o muro periférico de 1 m a encostar na alma dos pilares. De forma análoga, também foi considerado que as madres de cobertura apoiam no banzo superior das vigas e as madres de fachada trabalham entre pilares, na zona da alma. Os pilares de empena são rotulados em ambas as extremidades do elemento, sendo o fenómeno da encurvadura lateral condicionante na verificação de segurança, por isso recorreu-se ao *software LTBeamN* para refinar o cálculo do momento crítico (M_{cr}).

3.3 Materiais

No que diz respeito aos materiais utilizados, foram considerados os seguintes:

- Betão armado em elementos estruturais:
 - Betão de limpeza C12/15
 - Betão das fundações C25/30
- Aço em elementos de betão armado
 - Varões A500NR (LNEC E450:1998)
 - Redes eletrossoldadas A500EL (LNEC E457:2002)
 - Chumbadouros Classe 8.8
- Aço em elementos de estrutura metálica
 - Perfis laminados e chapas de ligação Variável (EN 10025-2)
 - Chapas para perfis enformados a frio S280GD (EN 10346)
 - Parafusos e porcas Classe 8.8 (EN 15048-1)
 - Anilhas EN ISO 7089

3.4 Quantificação de Ações

3.4.1 Ações Permanentes

Os pesos próprios (*PP*) dos elementos estruturais foram obtidos tendo em conta as suas características geométricas e as densidades constantes na EN 1991-1-1:

- Aço 77 kN/m³

As restantes cargas permanentes (*RCP*) foram determinadas sabendo que as madres não estão representadas no modelo de cálculo e tem de ser considerado o seu peso. Além disso tem de ser considerado o peso do revestimento e de instalações suspensas. Os dados dos painéis sandwich foram retirados de tabelas de fornecedores deste tipo de materiais. As instalações suspensas, habitualmente correspondem a iluminação. Na Figura 3-5 são apresentadas as restantes cargas permanentes aplicadas, sabendo que:

- Cobertura:
 - Madres C200x2 espaçadas de 1,5 m 0,04 kN/m²
 - Painel sandwich de cobertura de 50mm de esp. 0,12 kN/m²
 - Instalações suspensas 0,10 kN/m²
- Fachada:
 - Madres C200x2 espaçadas de 1,8 m 0,04 kN/m²
 - Painel sandwich de fachada de 50mm 0,11 kN/m²

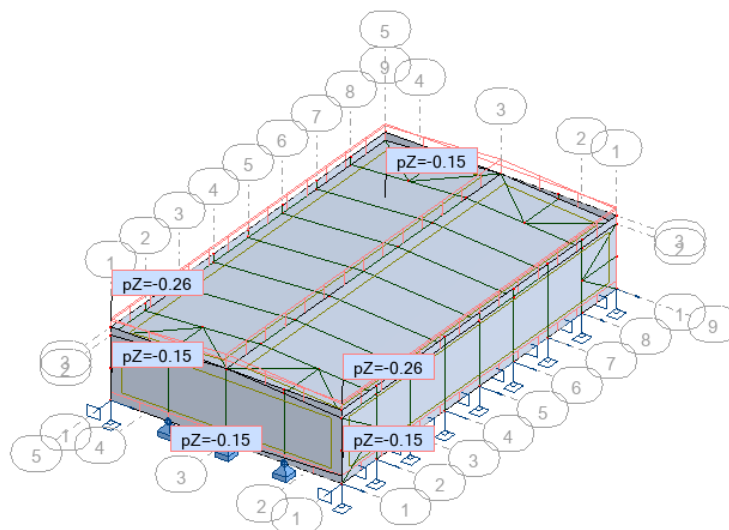


Figura 3-5 – Aplicação no modelo estrutural das cargas permanentes

3.4.2 Ações Variáveis

Foram consideradas as ações variáveis gravíticas e climatéricas correspondentes à localização e geometria do edifício, de acordo com as várias partes da EN 1991.

Ao nível das ações acidentais, as ações sísmicas, de acordo com a EN 1998-1, não foram consideradas. Já a ação do fogo, de acordo com a EN 1991-1-2, irá ser tratada mais à frente em detalhe, no subcapítulo 3.4.3.

3.4.2.1 Sobrecargas

As sobrecargas consideradas para a cobertura seguem o que é definido na EN 1991-1-1, de acordo com a sua utilização prevista (ver Figura 3-6).

- Cobertura:

- Categoria H

$$0,4 \text{ kN/m}^2 (\psi_0=0.0, \psi_1=0.0, \psi_2=0.0)$$

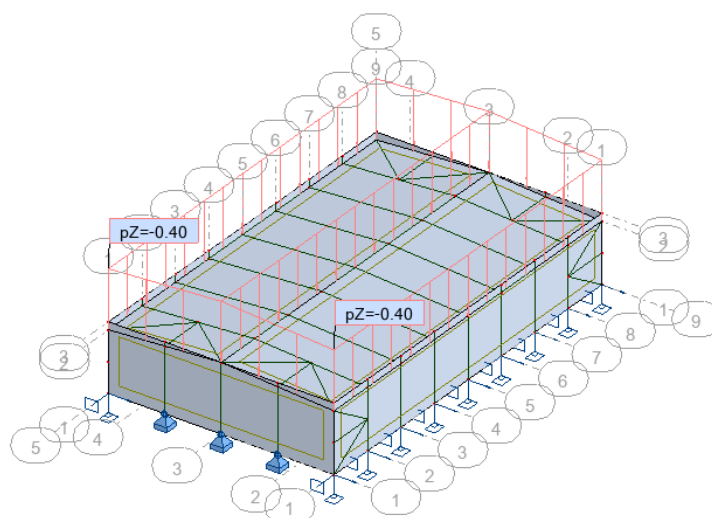


Figura 3-6 – Aplicação no modelo estrutural da sobrecarga

3.4.2.2 Neve

A neve (S) foi considerada neste dimensionamento de acordo com a EN 1991-1-3. Tendo em conta que o edifício está localizado em Peniche, a cerca de 30 m de altitude relativamente ao nível médio das águas do mar. Assumindo que o terreno tem uma topografia normal (C_e), sem fluxo térmico na cobertura (C_t), um coeficiente zonal (C_z) relativo à zona Z_2 e um coeficiente de forma para a carga da neve (μ_1) para uma cobertura de duas vertentes, obteve-se uma carga da neve de **0,08 kN/m²**, conforme o Quadro 3-1, a aplicar em toda a área da cobertura (ver a Figura 3-7).

Quadro 3-1 – Valores obtidos para o cálculo da ação da neve

C_e	C_t	H [m]	C_z	s_k [kN/m ²]	μ_1	s [kN/m ²]
1	1	30	0,10	0,10	0,8	0,08

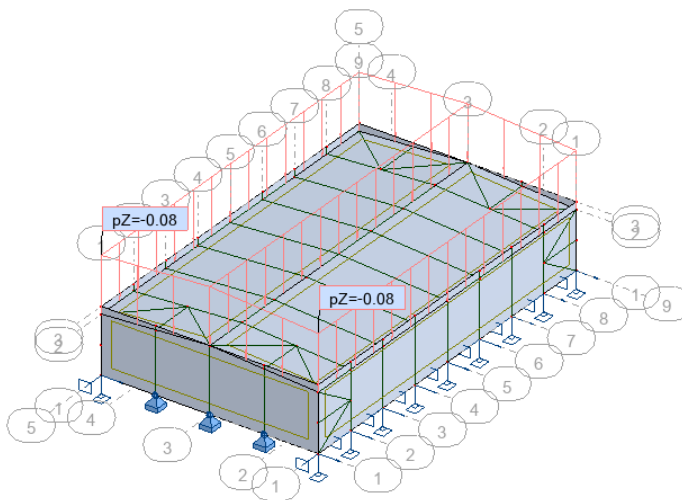


Figura 3-7 – Aplicação no modelo estrutural da ação da neve

3.4.2.3 Vento

A ação do vento foi também quantificada para este estudo, conforme a EN 1991-1-4. Para quantificar esta ação, admitiu-se que não há redução do efeito desta ação devido ao coeficiente de direção (C_{dir}) e ao coeficiente de sazão (C_{season}), porque considera-se que o edifício está sujeito a todas as direções do vento e em qualquer altura do ano. O valor básico de referência da velocidade do vento ($v_{b,0}$) para Peniche corresponde ao da Zona B, que é igual ao valor de referência da velocidade do vento (v_b), conforme o Quadro 3-2.

Quadro 3-2 – Valores obtidos para o cálculo da velocidade do vento de referência

C_{dir}	C_{season}	$v_{b,0}$ [m/s]	v_b [m/s]
1	1	30	30

Prosseguindo a marcha de cálculo da EN 1991-1-4, considerou-se uma categoria de terreno I, para determinar o comprimento de rugosidade (z_0); considerando a altura do edifício de 9 m determinou-se a velocidade média do vento a uma dada altura ($v_m(z)$) (ver Quadro 3-3).

Quadro 3-3 – Valores obtidos para o cálculo da velocidade média do vento

z [m]	$z_{0,II}$ [m]	z_0 [m]	z_{min} [m]	z_{max} [m]	k_r	$c_r(z)$	$c_0(z)$	$v_m(z)$ [m/s]
9	0,05	0,005	1	200	0,162	1,21	1	36,36

Por fim, recorreu-se a mais algumas operações matemáticas de acordo com o EN 1991-1-4, em que se admitiu um coeficiente de turbulência (k_t) e uma massa volúmica do ar (ρ) de acordo

com o recomendado pelo Anexo Nacional e, deste modo, determinou-se a pressão dinâmica de pico a uma dada altura ($q_p(z)$) com um valor de **1,60 kN/m²**, de acordo com o Quadro 3-4.

Quadro 3-4 – Valores obtidos para o cálculo da pressão dinâmica de pico

k_I	σ_v	$I_v(z)$	ρ [kg/m ³]	$q_p(z)$ [kN/m ²]
1	4,85	0,133	1,25	1,60

De acordo com a EN 1991-1-4, o valor da ação do vento a aplicar é constante em toda a altura do edifício porque a largura (b) é superior a essa altura (h), segundo a Figura 3-8.

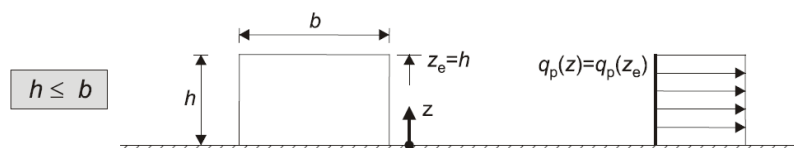


Figura 3-8 - Variação da ação do vento em altura

Relativamente à aplicação da ação do vento no edifício, foram consideradas apenas 2 direções do vento, porque existe uma relação de simetria nos dois eixos cartesianos em planta, que dispensa o cálculo nas 4 direções, conforme a Figura 3-9.

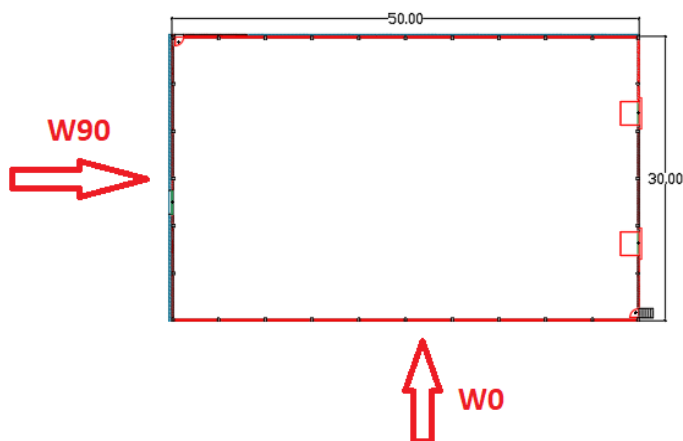


Figura 3-9 - Direções do vento consideradas

A carga de vento é aplicada em cada direção, tendo em conta as pressões internas e externas que se geram, assim como o zonamento das várias intensidades de carga, de acordo com a EN 1991-1-4. Para cada caso foram consideradas as pressões ou sucções sobre fachada e cobertura mais condicionantes na verificação da segurança da estrutura.

3.4.2.4 Temperatura

A ação da temperatura em edifícios deve ser considerada, de acordo com a EN 1991-1-5. Assim, considerou-se a ação da temperatura uniforme (ΔT_u), a qual se obtém pela expressão:

$$\Delta T_u = T - T_0 \quad (22)$$

Esta componente resulta da diferença entre as temperaturas médias (T), quer para Verão, quer para Inverno, e a sua temperatura inicial (T_0), que é igual a 15°C de acordo com o Anexo Nacional Português da respetiva norma. Usando a formulação da cláusula 5.3 da EN 1991-1-5 e admitindo que a superfície do edifício é de cor escura, obtiveram-se os resultados indicados no Quadro 3-5.

Quadro 3-5 – Valores obtidos para o cálculo da ação da temperatura

Temperatura	Verão [°C]	Inverno [°C]
T_5	5	-
$T_{máx}$	34,7	-
T_{out}	39,7	-0,25
T_{in}	25	18
T	32,35	8,93
T_u	17,35	-6,07

Estes valores ΔT_u são aplicados a todos os elementos do edifício.

3.4.3 Fogo

Como foi referido na introdução do caso de estudo, a solução em betão pré-fabricado respeitava o requisito ao fogo R90. A solução alternativa em aço também irá ser dimensionada para R90, para permitir uma comparação entre as duas soluções.

3.4.3.1 Requisito ao fogo de acordo com a legislação portuguesa

Em muitos casos, o requisito ao fogo é definido pelo dono de obra ou pelo projetista que o representa. Ainda assim, é sempre recomendado verificar esse mesmo requisito, para perceber se pode estar inflacionado e assim contrapor um outro requisito, devidamente sustentado pela legislação.

Começando pela utilização deste edifício e sabendo que se destina a um armazém, a sua utilização-tipo, de acordo com o artigo 8 do Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12 de novembro, é do tipo XII, que corresponde a edifícios destinados a “indústria, oficinas e armazéns”.

Para encontrar a categoria de risco, de acordo com o Quadro X do Anexo III do mesmo Decreto-Lei, é preciso determinar primeiro a densidade de carga de incêndio modificada. Como foi abordado no capítulo anterior, existe mais do que uma forma de calcular este parâmetro. A forma mais simples e mais expedita consiste em utilizar os dados fornecidos pelo Despacho n.º 2074/2009 de 15 de janeiro. O método proposto pelo Anexo E da EN 1991-1-2 é um pouco mais trabalhoso e segundo o Anexo Nacional, não permite que sejam usados os fatores de minoração (ou majoração), também não prevê nenhuma ocupação correspondente a este caso de estudo, e define um fator de combustão (m) igual a 1, ao invés de 0,8 tal como indicado na EN 1991-1-2. Ou seja, são alguns aspetos que tornam mais conservador o cálculo pela EN 1991-1-2, que levam a escolher a abordagem da legislação nacional.

A partir do Quadro II do Anexo do Despacho n.º 2074/2009 de 15 de janeiro, retira-se o valor da densidade de carga de incêndio para o armazenamento de embalagens alimentares conforme o Quadro 3-6.

Quadro 3-6 – Densidade de carga de incêndio de acordo com o Despacho n.º 2074/2009

Actividade	Fabricação e reparação		Armazenamento	
	q_{ei} (MJ/m ²)	R_{ai}	q_{vi} (MJ/m ³)	R_{ai}
Açúcar			8 400	Alto
Açúcar, produtos de	800	Médio	800	Médio
Acumuladores / Baterias	400	Médio	800	Médio
Acumuladores / Baterias, expedição	800	Médio		
Adubos químicos	200	Médio	200	Baixo
Água oxigenada				
Agulhas de aço	200	Médio		
Alcatrão			3 400	Alto
Alcatrão, produtos de	800	Médio		
Algodão em rama, guata	300	Baixo	1 100	Alto
Algodão, armazém de			1 300	Alto
Alimentação, embalagem	800	Médio	800	Médio
Alimentação, expedição	1 000	Alto		
Alimentação, matérias-primas			3 400	Alto
Alimentação, pratos pré-cozinhados	200	Baixo		
Alumínio, produção de	40	Baixo		
Alumínio, trabalho de	200	Baixo		
Amido	2 000	Alto		

Do Quadro 3-6 retira-se o valor da densidade de carga de incêndio por unidade de volume relativa à zona de armazenamento (q_{vi}) e o coeficiente adimensional de ativação do constituinte combustível armazenado (R_{ai}). Usando a fórmula do método probabilístico para atividades de armazenamento previstas no Artigo 3 do Despacho, determina-se a densidade de carga de incêndio modificada através da equação:

$$q_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cr}} q_{vi} h_i S_i C_i R_{ai}}{\sum_{i=1}^{N_{cr}} S_i} \quad [\text{MJ/m}^2] \quad (23)$$

Assumiu-se uma altura (h_i) de 6 m para armazenamento das embalagens, ou seja, deixa-se um pouco de margem entre a ligação pilar-viga (com esquadro de reforço) e o topo das prateleiras para poder ser movimentado por um empilhador. Relativamente às áreas (S_i), neste tipo de armazém, o mais habitual é encontrar uma sucessão de prateleiras / paletes separadas por corredores; por conseguinte, considerou-se que metade da área em planta esteja a ser utilizada pelo material combustível. Desconhecendo exatamente o tipo de produtos que vão ser armazenados, admitiu-se um coeficiente adimensional de combustibilidade (C_i) médio (ver Quadro 3-7).

Quadro 3-7 – Valores obtidos para o cálculo da densidade de carga de incêndio

q_{vi} [MJ/m ³]	h_i [m]	S_i [m ²]	C_i	R_{ai}	ΣS_i [m ²]	q_s [MJ/m ²]
800	6	750	1,3	1,5	1500	4680

No Quadro X do Anexo III do Decreto-Lei nº 220/2008 de 12 de novembro (ver Quadro 3-8), estão estabelecidos os critérios para determinar a categoria de risco sabendo que a densidade de carga de incêndio modificada é de 4680 MJ/m² e que não há pisos abaixo do plano de referência:

Quadro 3-8 – Categorias de Risco da Utilização-Tipo XII

**Categorias de risco da utilização-tipo XII
«Industriais, oficinas e armazéns»**

Categoria	Critérios referentes à utilização-tipo XII		
	<u>Integrada em edifício</u>		Ao ar livre
	Carga de incêndio modificada da UT XII	Número de pisos ocupados pela UT XII abaixo do plano de referência	Carga de incêndio modificada da UT XII
1. ^a	(*) ≤ 500 MJ/m ²	0	(*) ≤ 1 000 MJ/m ²
2. ^a	(*) ≤ 5 000 MJ/m ²	≤ 1	(*) ≤ 10 000 MJ/m ²
3. ^a	(*) ≤ 15 000 MJ/m ²	≤ 1	(*) ≤ 30 000 MJ/m ²
4. ^a	(*) > 15 000 MJ/m ²	> 1	(*) > 30 000 MJ/m ²

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

Como indicado na nota de rodapé do Quadro 3-8, quando o edifício é utilizado exclusivamente como armazém, os limites são multiplicados por 10. Sendo assim, o limite superior da 1.^a

categoria de risco é de 5000 MJ/m², fazendo com que este edifício se enquadre na 1ª categoria de risco.

Por fim, e recorrendo ao Artigo 15 da Portaria nº 135/2020 de 2 de junho (Ministério da Administração Interna, 2020), determinou-se um requisito de **R60** para elementos com função de suporte, sabendo que é da utilização-tipo XII e da 1ª categoria de risco, conforme o Quadro 3-9.

Quadro 3-9 – Requisitos de resistência ao fogo padrão

Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios

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

Se a densidade carga de incêndio modificada fosse bastante superior à que foi calculada, e com isso resultasse uma 2ª, 3ª ou ainda 4ª categoria de risco, este mesmo Artigo 15 desta Portaria indica que para edifícios de um só piso, como acontece neste tipo de construção, devem possuir um requisito de R60. Ou seja, esta Portaria elaborada em 2020, que veio alterar o Decreto-Lei redigido em 2008, admite que edifícios de um só piso, à exceção de edifícios habitacionais, podem ter o requisito mínimo de R60. Esta nota, pode fazer a diferença para uma solução estrutural competitiva em aço. E para o dono de obra, traduz-se numa redução de custos, que pode ser significativa. No entanto, ao ser determinado um requisito de R60 para cumprir o regulamento de segurança contra incêndios em edifícios, quando o caderno de encargos deste caso de estudo exigia um requisito de R90, isto significa que estava a ser solicitado um requisito superior ao que era necessário.

No entanto, este subcapítulo serve essencialmente para demonstrar que neste caso, tal como em muitos outros em Portugal, os requisitos de incêndio podem estar empolados sendo benéfico uma verificação adicional, para se garantir que se atinge a solução mais económica. Para este caso de estudo, todo o dimensionamento será a respeitar o requisito de incêndio R90, tal como a solução inicial de betão.

3.4.3.2 Ação em estruturas expostas ao fogo

Como já foi abordado anteriormente, existem vários tipos de curva de incêndio, dependendo do seu grau de complexidade e do seu rigor relativamente à realidade. Para este caso de estudo, é

vantajoso estudar mais que uma curva para perceber o que se pode ganhar com isso. Por isso, foram estudadas 3 curvas de incêndio:

- a curva ISO 834 (ver a Figura 3-10) - a curva mais simples, conservadora e a que é adotada mais vezes. A temperatura só varia com o tempo, independentemente das características do edifício.

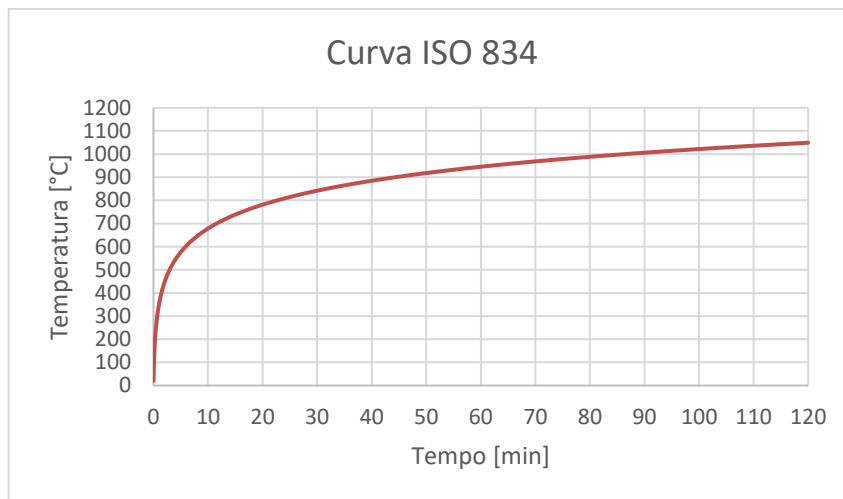


Figura 3-10 – Curva ISO 834

- a curva paramétrica, de acordo com o Anexo A da EN 1991-1-2 (ver Figura 3-11)– em primeiro lugar, as premissas para usar as curvas paramétricas não são cumpridas, uma vez que o edifício em análise com uma área de 1500 m² e a altura de 8 m, fica bastante acima dos limites estabelecidos. Ainda assim, e com base no estudo desenvolvido (Eberius & Fjällström, 2017), as curvas paramétricas podem representar um comportamento realista para áreas de implantação até 5000 m². Suportado nesse estudo, segue-se em frente no cálculo desta curva de incêndio. Começando pelo fator de abertura (O), e sabendo que existem 3 portões seccionados e 2 portas de homem, obtêm-se os valores indicados no Quadro 3-10.

Quadro 3-10 – Dados para a obtenção do fator de abertura

A_v [m ²]	h_{eq} [m]	A_t [m ²]	O [m ^{1/2}]
27	3	4280	0,010

O valor de O é bastante baixo, ficando também fora do limite imposto pelo Anexo A da EN 1991-1-2. Isto significa que o número de aberturas verticais e respetiva dimensão são insuficientes para a área de compartimento em análise. Ainda assim, prosseguindo no cálculo, para determinar o parâmetro Γ , falta considerar as propriedades dos materiais das várias faces

do compartimento, sendo as paredes e teto revestidos com painel sandwich e o pavimento de betão, com as propriedades indicadas no Quadro 3-11:

Quadro 3-11 - Propriedades dos materiais do compartimento

ρ_{painel} [kg/m ³]	$\rho_{\text{betão}}$ [kg/m ³]	c_{painel} [J/kgK]	$c_{\text{betão}}$ [J/kgK]	λ_{painel} [W/mK]	$\lambda_{\text{betão}}$ [W/mK]	b [J/m ² s ^{1/2} K]
43	2300	1000	1000	0,0212	1,6	696,0

Com os cálculos anteriores, determina-se um parâmetro de Γ de 0,173.

Determinou-se a temperatura máxima ($\theta_{\text{máx}}$) e o respetivo tempo ($t_{\text{máx}}$) em que isso acontece, sabendo que o incêndio é controlado pela ventilação e que a taxa de crescimento é rápida (de acordo com o Anexo E, tendo em conta as ocupações indicadas), conforme o Quadro 3-12.

Quadro 3-12 – Fase de aquecimento da curva paramétrica

$q_{f,d}$ [MJ/m ²]	$q_{t,d}$ [MJ/m ²]	t_{lim} [min]	$t_{\text{máx}}$ [h]	$t_{\text{máx}}^*$ [h]	$\theta_{\text{máx}}$ [°C]
4680	1640	15	32,86	5,685	1207,3

A fase de aquecimento tem o seu término ao fim de quase 33h, ao atingir os 1207,3 °C. Este valor demonstra que este incêndio tem uma fase de aquecimento muito longa, que para o requisito de 90 minutos (1,5 horas), significa que não terá a fase de arrefecimento neste período, aproximando-se à curva proposta pela ISO 834, quanto à sua forma e não em valores absolutos.

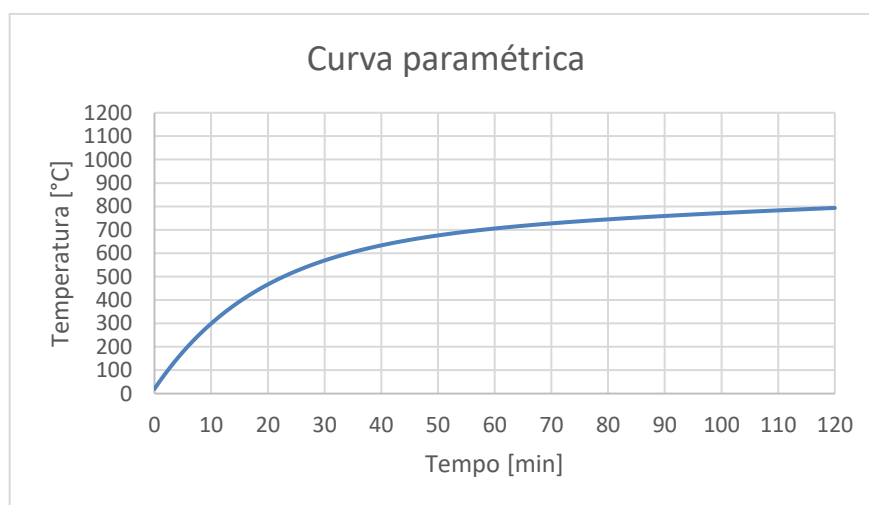


Figura 3-11 – Curva paramétrica para o edifício em estudo

- a terceira alternativa corresponde à utilização do *software Ozone 3* (Cadorin & Franssen, 2003), que é um programa de modelação de incêndio avançada, com modelos de zona e balanços energéticos. Na interface do software foram colocadas as características geométricas e dos respetivos materiais do edifício (ver Figura 3-12). Foram também definidas as aberturas e não foi considerada ventilação forçada na cobertura. Habitualmente, de acordo com o projeto de segurança contra incêndios tem-se preferência pela ventilação natural (desenfumadores).

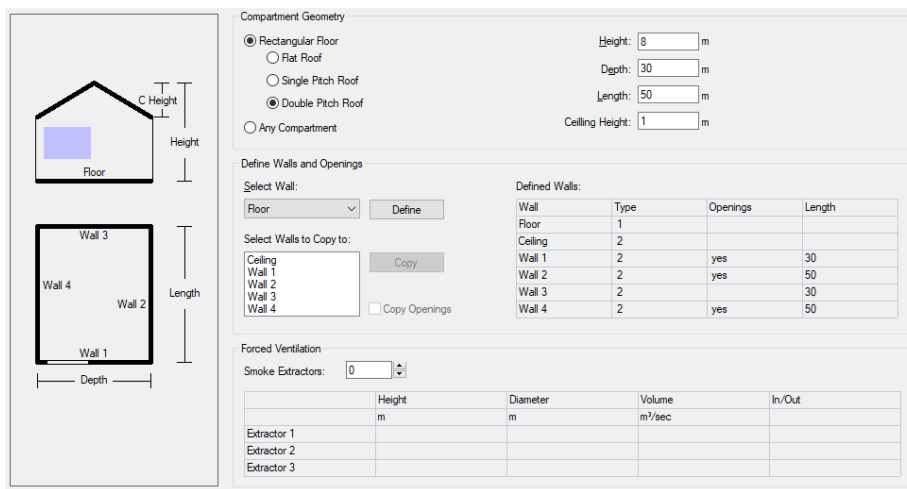


Figura 3-12 – Interface do *Ozone 3* – características geométricas

Após a definição do compartimento, introduzem-se os dados relativos à ação térmica (ver a Figura 3-13), à luz do Anexo Nacional da EN 1991-1-2, nomeadamente a densidade de carga de incêndio, a taxa de crescimento, o RHR_f (semelhante à “biblioteca” que é o caso mais severo do Anexo E da EN 1991-1-2) e o fator de combustão, admitindo que é material celulósico.

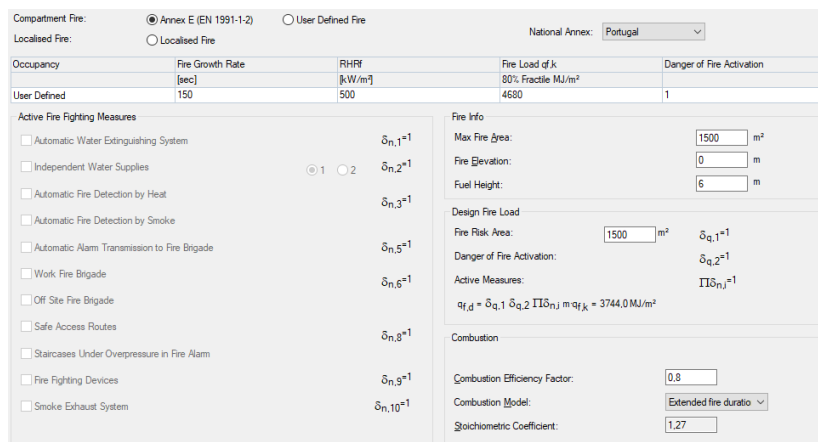


Figura 3-13 – Interface do *Ozone 3* – ação térmica

De referir, que foi escolhida uma abordagem com uma única zona onde a temperatura é constante em todo o compartimento, mais adequado para este tipo de incêndios. Tendo feito todos os *inputs* do *software*, é devolvido o *output* da respetiva curva de incêndio, como ilustrado na Figura 3-14.

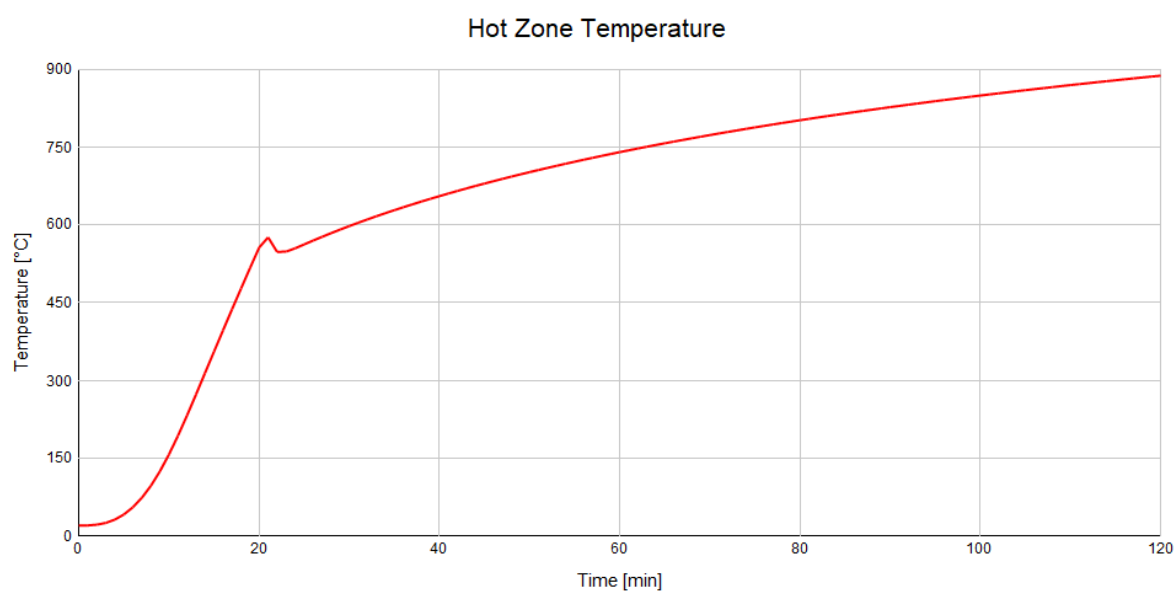


Figura 3-14 – *Output* do *Ozone 3* – Curva de incêndio

Tal como as duas primeiras curvas apresentadas anteriormente, a curva está sempre em crescimento, sendo a fase de arrefecimento bem mais à frente no tempo. De notar que existe um pico próximo dos 20 minutos, resultante de uma singularidade das expressões matemáticas que servem de base a este modelo, não tendo qualquer significado físico.

Para entender melhor o comportamento do fogo descrito nas 3 curvas, procede-se a uma análise comparativa, sobrepondo todas no mesmo referencial, conforme apresentado na Figura 3-15.

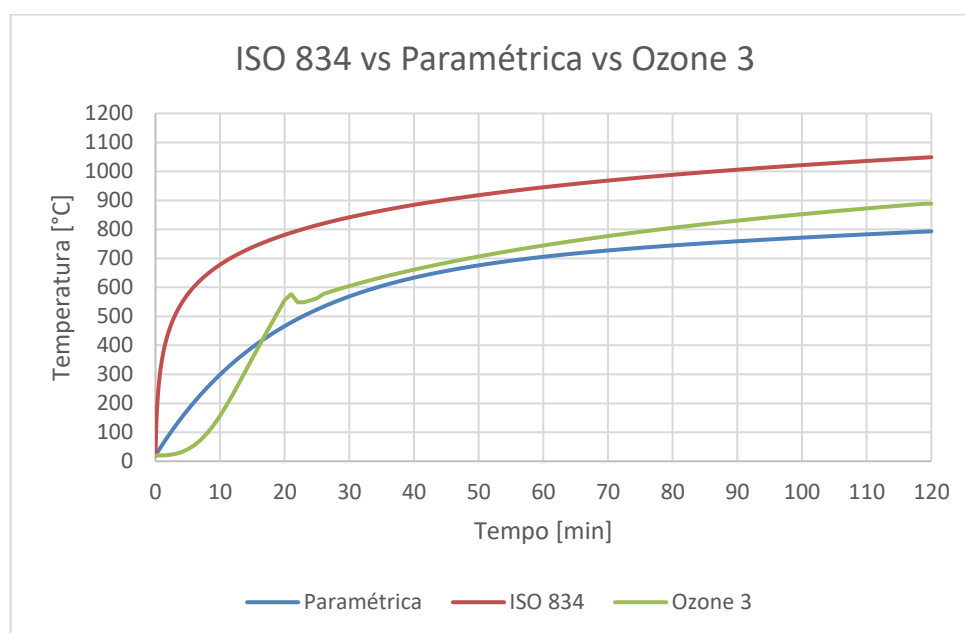


Figura 3-15 – Sobreposição das 3 curvas de incêndio

Como era de esperar a curva ISO 834, é bastante mais conservadora que as outras duas. As curvas paramétricas e do *Ozone 3* tem um crescimento semelhante (na sua forma), sendo mais realista a curva do *software* na fase inicial quando se dá o *flashover*, onde tem uma pendente mais acentuada própria dessa fase. Esta semelhança no crescimento das duas curvas mencionadas, é também uma validação de uma em relação à outra, uma vez que a curva paramétrica desviava do domínio do Anexo A da EN 1991-1-2. Daqui em diante adota-se a curva do *Ozone 3*.

3.4.4 Imperfeições

A EN 1993-1-1 prevê a inclusão de efeitos resultantes de imperfeições geométricas e tensões residuais. Os efeitos das imperfeições podem ser relevantes segundo as duas direções (x e y), quando os elementos estruturais estão submetidos a cargas verticais. Sabendo que a altura total da estrutura (h) e considerando cada pilar como um elemento isolado para a obtenção do valor de m , obtém-se uma imperfeição global do pórtico (ϕ) de **0,0024**, de acordo com o Quadro 3-13.

Quadro 3-13 – Imperfeições globais

ϕ_0	h [m]	α_h	m	α_m	ϕ
0,005	9	0,67	24	0,721	0,0024

Multiplicando a imperfeição global do pórtico (ϕ) pelas cargas verticais, geram-se 4 casos de carga, que representam as forças horizontais aplicadas segundo duas direções ortogonais, para cargas verticais permanentes e para cargas verticais variáveis. Não foram introduzidas as imperfeições locais dos elementos, uma vez que estas são consideradas nas curvas de dimensionamento de encurvadura de elementos nas verificações previstas pela EN 1993-1-1.

3.4.5 Resumo das Cargas Consideradas

Depois de quantificadas todas as cargas (incluindo as equivalentes às imperfeições), apresenta-se o Quadro 3-14 com a indicação do respetivo número do caso de carga associado ao *software* de cálculo utilizado (*Robot*):

Quadro 3-14 – Casos de carga

Nº	Caso de carga	Abreviatura	Tipo
1	Peso próprio	PP	Permanentes
2	Restantes cargas permanentes	RCP	Permanentes
3	Neve	Qcob	Variáveis
4	Sobrecarga - Cobertura	Neve	Variáveis
5	Vento a 0° - Pressão	W0 pressão	Variáveis
6	Vento a 0° - Sucção	W0 sucção	Variáveis
7	Vento a 90° - Pressão	W90 pressão	Variáveis
8	Vento a 90° - Sucção	W90 sucção	Variáveis
9	Temperatura de Verão	Temp V	Variáveis
10	Temperatura de Inverno	Temp I	Variáveis
11	Imperfeições x+ (cargas permanentes)	Notional loads P X+	Imperfeições
12	Imperfeições y+ (cargas permanentes)	Notional loads P Y+	Imperfeições
13	Imperfeições x+ (cargas variáveis)	Notional loads Q X+	Imperfeições
14	Imperfeições y+ (cargas variáveis)	Notional loads Q Y+	Imperfeições

3.5 Combinações de Ações

Para a verificação dos elementos para Estados Limites Últimos e Estados Limites de Utilização, apresenta-se nos ANEXOS as combinações consideradas na análise tendo em conta o que foi abordado no subcapítulo 2.2.3.2.

3.6 Análise e Resultados

3.6.1 Análise de Segunda Ordem

De acordo com a EN 1993-1-1, os efeitos de 2ª ordem não foram considerados na análise global da estrutura, uma vez que não se verificou um modo global de encurvadura, em mais de 100 modos analisados e tendo sido obtido um fator de carga (α_{cr}) superior a 10 nos últimos modos analisados.

3.6.2 Verificações de Segurança de Elementos Metálicos

As verificações de segurança dos elementos metálicos para Estados Limites Últimos foram efetuadas à luz do preconizado na EN 1993-1-1, tendo por base os esforços atuantes obtidos do modelo de cálculo. Os pilares estão sujeitos a esforços de elevada intensidade de esforço axial e momento fletor, por isso as verificações mais condicionantes neste dimensionamento foram: a tração, a compressão tendo em conta a encurvadura, momento fletor tendo em conta a encurvadura lateral e a flexão composta. As vigas apresentam valores dos momentos fletores elevados, enquanto os outros esforços são menos condicionantes no dimensionamento, por isso foram verificados: o momento fletor com encurvadura lateral e a flexão composta. Nos travamentos atua só o esforço axial, e conseqüentemente foram verificadas as resistências à tração e compressão com a ocorrência de encurvadura. Dado o *software* de cálculo utilizado dispor de ferramentas de cálculo automático de acordo com a norma referida, todas as verificações necessárias foram efetuadas diretamente neste, como se exemplifica na Figura 3-16 e Figura 3-17. Já para Estados Limites de Utilização foram verificadas as deformações máximas horizontais no topo dos pilares e a deformação máxima vertical a meio vão (na cumeeira).

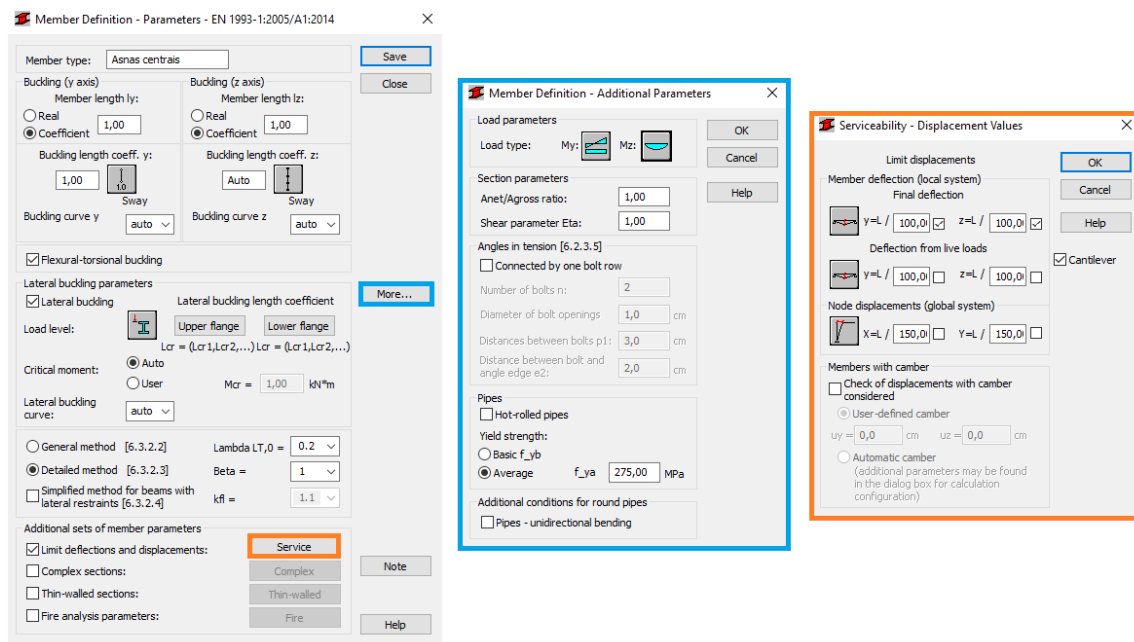


Figura 3-16 - *Member Type* das Vigas centrais

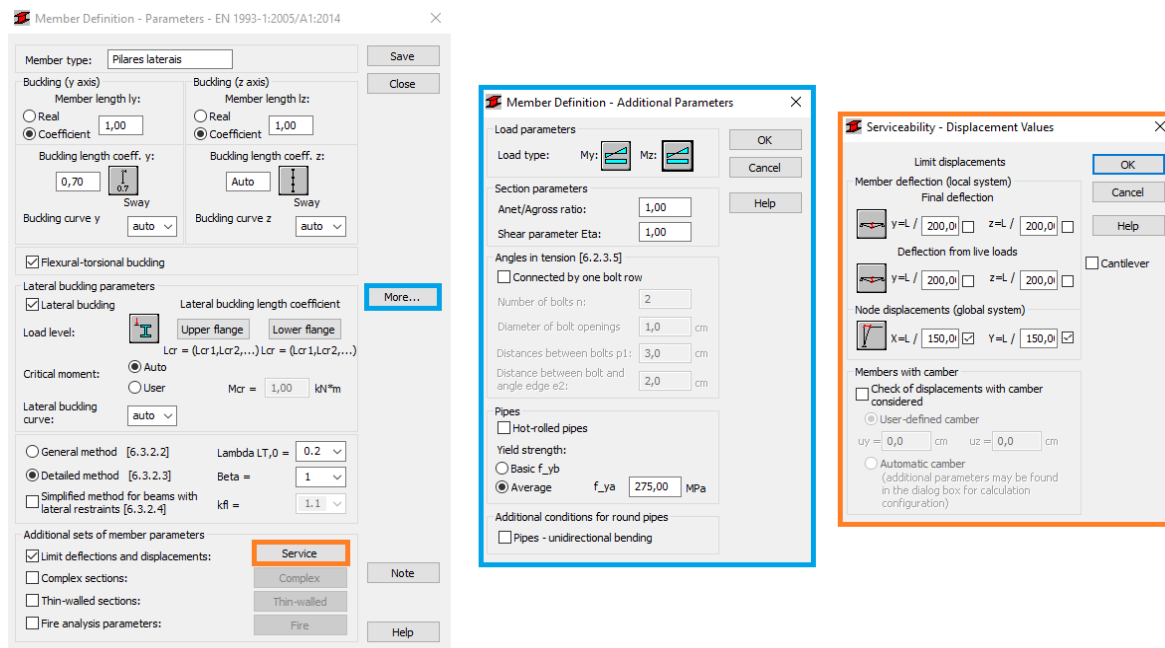


Figura 3-17 - *Member Type* dos Pilares laterais

3.6.2.1 Dimensionamento à temperatura ambiente

Usando somente aços da classe S275 (solução nº 1), foi verificada a segurança dos perfis indicados na Figura 3-18. Nos ANEXOS são apresentados os relatórios de cálculo do *Robot*

para o pilar, a viga e o contraventamento mais esforçados. Também é apresentado nos ANEXOS, a interface do *LTBeamN* na obtenção do momento crítico dos pilares de empena.

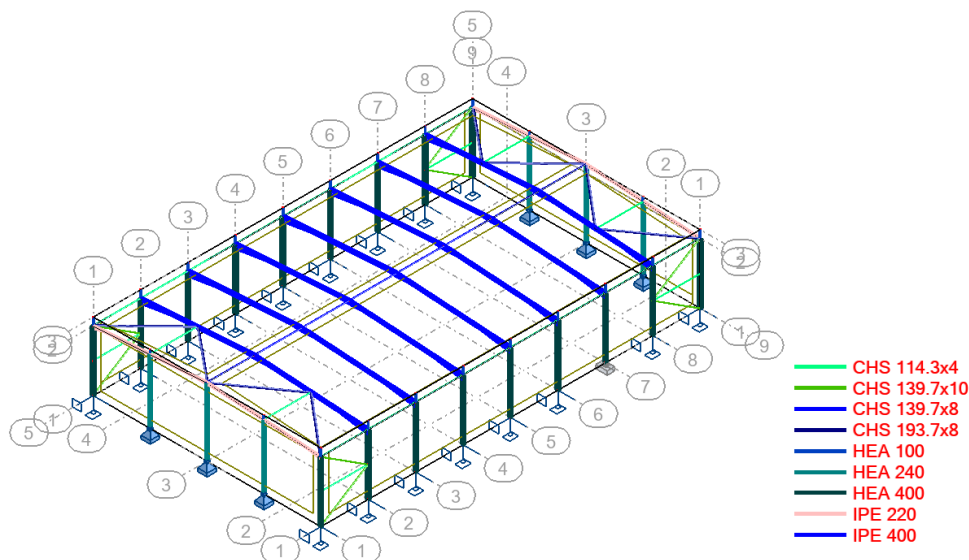


Figura 3-18 – Modelo estrutural com os perfis usados na solução em S275

À exceção das vigas centrais, todos os elementos foram condicionados pela resistência da secção transversal. As vigas centrais foram condicionadas pela deformação a meio vão. Neste caso, a deformação máxima na cumeeira é de 15,3 cm (conforme a Figura 3-19), sendo o limite máximo de 15 cm. Admite-se que estas vigas cumprem, uma vez que esta deformação também acontece com a ação variável base do vento de sucção na cobertura (combinação 225), o que se considera que não é tão problemático visualmente, sem necessidade de aplicar qualquer contraflecha.

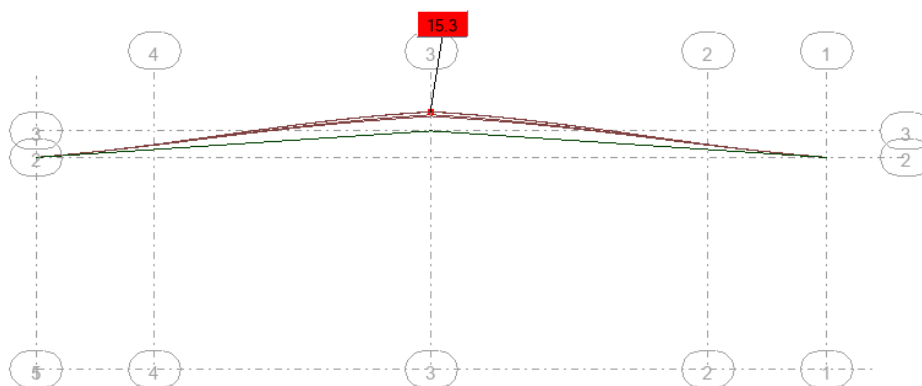


Figura 3-19 – Deformação das vigas de cobertura para a combinação 225

O Quadro 3-15, indica os pesos de todos os perfis utilizados na solução estrutural em aço da classe S275. Totalizando **47024 kg**, sem chapas de ligação, somente perfis medidos de eixo a eixo. Isto equivale a um rácio de **31,35 kg/m²**.

Quadro 3-15 – Tabela de quantidades na solução em aço da classe S275

Type	Number	Length (m)	Unit weight (kG/m)	Bar weight (kG)	Total weight (kG)	Painting area (m2)
S 275						
CHS 114.3x4	24	6,25	10,88	67,99	1632	53,84
CHS 139.7x8	8	6,25	25,99	162,46	1300	21,95
CHS 139.7x10	8	7,42	31,96	237,15	1897	26,06
CHS 193.7x8	8	9,78	36,67	358,66	2869	47,65
HEA 100	4	0,50	16,68	8,34	33	1,12
HEA 100	18	1,00	16,68	16,68	300	10,11
HEA 240	4	8,50	60,34	512,87	2051	46,54
HEA 240	2	9,00	60,34	543,04	1086	24,64
HEA 400	18	8,00	124,84	998,74	17977	275,28
IPE 220	4	15,04	26,21	394,13	1577	50,99
IPE 400	14	15,04	66,33	997,57	13966	308,84
Bracket 0.1x0,5					611	14,52
Bracket 0.25x0,9					1648	39,40
Bracket 0.1x0,9					76	2,64
Total					47024	923,57

Importa referir que esta solução não era a mais otimizada, se o dimensionamento ao fogo não fosse tão condicionante neste caso de estudo. Para o dimensionamento à temperatura ambiente, os pilares laterais com uma secção IPE550 verificavam a segurança, perfazendo um peso total da estrutura principal de 43958 kg, com um rácio de 29,31 kg/m². No entanto, esta solução foi descartada ao longo do dimensionamento porque era muito penalizada nas verificações de segurança em situação de incêndio.

Subindo a classe do aço para S355 em todas as secções à exceção das vigas centrais e dos pilaretes da platibanda (solução nº 2), uma vez que estão já condicionados pela deformação, obtiveram-se os perfis indicados na Figura 3-20.

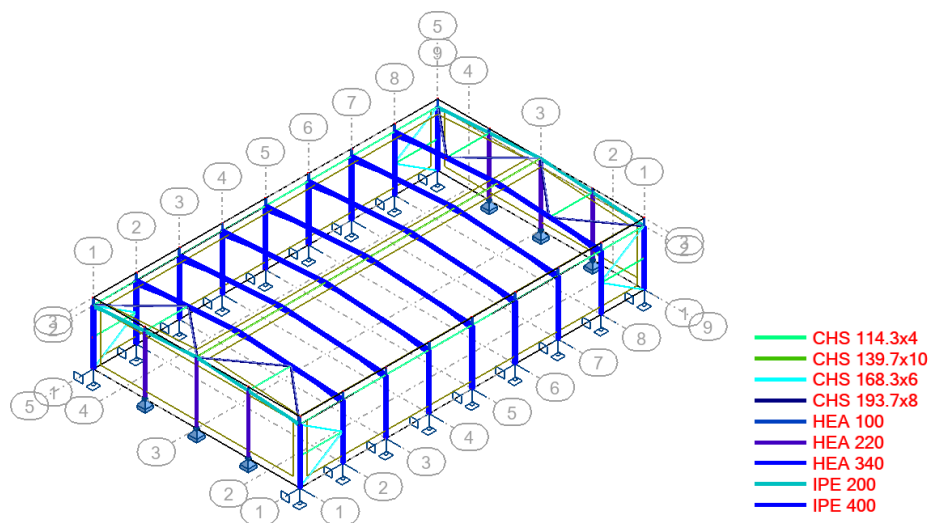


Figura 3-20 – Modelo 3D com os perfis usados na solução com aço S355

Com esta solução foi possível descer duas secções nos pilares laterais, uma secção nos pilares de empena e alguns contraventamentos. Com parciais de **16495 kg** em aço S275 e **26708 kg** em aço S355, conforme indicado no Quadro 3-16 Totalizando um peso de **43203 kg**, obtendo-se um rácio de **28,80 kg/m²**.

Quadro 3-16 – Tabela de quantidades na solução com aço S355

Type	Number	Length (m)	Unit weight (kG/m)	Bar weight (kG)	Total weight (kG)	Painting area (m2)
S 275						
HEA 100	4	0,50	16,68	8,34	33	1,12
HEA 100	18	1,00	16,68	16,68	300	10,11
IPE 400	14	15,04	66,33	997,57	13966	308,84
Total per sections						
Bracket 0.1x0,5					547	12,43
Bracket 0.25x0,9					1648	39,40
Total					16495	371,89
S 355						
CHS 114.3x4	24	6,25	10,88	67,99	1632	53,84
CHS 139.7x10	8	6,25	31,96	199,76	1598	21,95
CHS 168.3x6	8	7,42	24,01	178,17	1425	31,37
CHS 193.7x8	8	9,78	36,67	358,66	2869	47,65
HEA 220	4	8,50	50,53	429,47	1718	42,67
HEA 220	2	9,00	50,53	454,73	909	22,59
HEA 340	18	8,00	104,81	838,51	15093	258,43
IPE 200	4	15,04	22,37	336,42	1346	46,21
Bracket 0.1x0,5					53	1,91
Bracket 0.1x0,9					64	2,40
Total					26708	529,02

Fazendo o mesmo exercício para o aço da classe S460 (solução nº 3), conseguiu-se obter alguma otimização de peso apesar de ser menos expressiva, conforme a Figura 3-21.

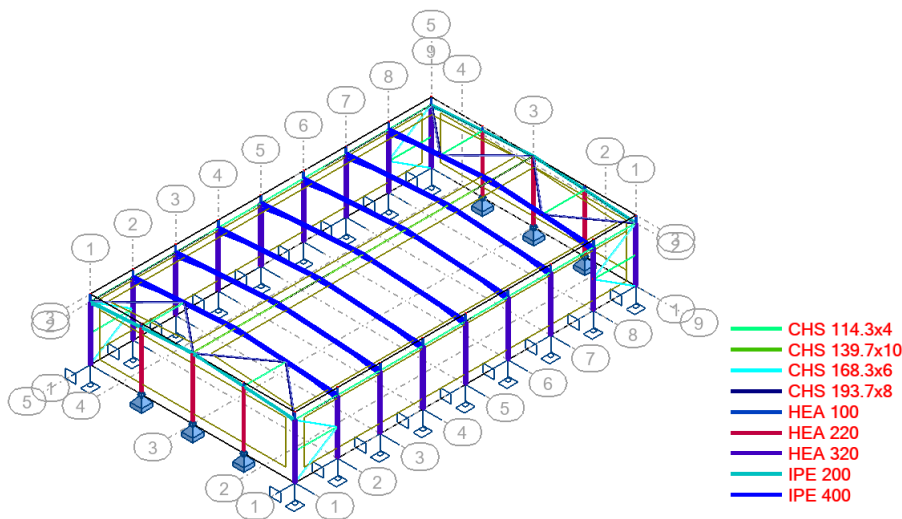


Figura 3-21 - Modelo 3D com os perfis usados na solução em aço S460

Só houve uma redução da secção transversal dos pilares laterais para HEA 320. As vigas centrais continuam condicionadas pela deformada. Os contraventamentos não beneficiaram com a subida de classe, uma vez que todo o edifício é mais flexível, devido à maior esbelteza das secções utilizadas, e consequentemente os contraventamentos são mais solicitados para travar o edifício na sua menor inércia. Para a solução com aço S460, um parcial de **16495 kg** para a classe S275, um outro parcial de **4091 kg** correspondente aos pilares e asnas de empena que se mantêm na classe S355, e por último, um parcial de **21588 kg** da classe S460, de acordo com o Quadro 3-17. Perfazendo um total de **42624 kg** com um rácio de **28,42 kg/m²**.

Quadro 3-17 - Tabela de quantidades na solução com aço S460

Type	Number	Length (m)	Unit weight (kG/m)	Bar weight (kG)	Total weight (kG)	Painting area (m2)
S 275						
HEA 100	4	0,50	16,68	8,34	33	1,12
HEA 100	18	1,00	16,68	16,68	300	10,11
IPE 400	14	15,04	66,33	997,57	13966	308,84
Bracket 0.1x0,5					547	12,43
Bracket 0.25x0,9					1648	39,40
Total					16495	371,89
S 355						
HEA 220	4	8,50	50,53	429,47	1718	42,67
HEA 220	2	9,00	50,53	454,73	909	22,59
IPE 200	4	15,04	22,37	336,42	1346	46,21
Bracket 0.1x0,5					53	1,91
Bracket 0.1x0,9					64	2,40
Total					4091	115,79
S 460 M/ML						
CHS 114.3x4	24	6,25	10,88	67,99	1632	53,84
CHS 139.7x10	8	6,25	31,96	199,76	1598	21,95
CHS 168.3x6	8	7,42	24,01	178,17	1425	31,37
CHS 193.7x8	8	9,78	36,67	358,66	2869	47,65
HEA 320	18	8,00	97,66	781,31	14064	252,81
Total					21588	407,62

A classificação das secções comprimidas também tem a desvantagem de penalizar mais esta classe do aço. Este parâmetro depende da classe do aço através do Quadro 3-18 retirado da EN 1993-1-1, para almas, por exemplo.

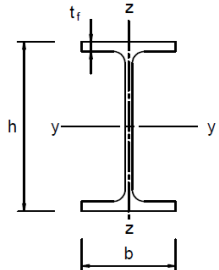
Quadro 3-18 – Excerto do quadro de cálculo do parâmetro ϵ da EN 1993-1-1

$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Para a classe S460, o valor de 0,71 já começa a ser muito baixo, o que pode significar a descida de 2ª para 3ª classe, o que implica logo a transição das resistências plásticas para as elásticas das secções transversais. Se a descida for de 3ª para 4ª classe, a redução das capacidades resistentes ainda é mais acentuada, com a introdução do conceito de área efetiva. Esta mesma redução também acontece para as classes S355, mas em grande parte dos casos a redução é de 1ª para 2ª classe, não tendo consequências no dimensionamento, apesar de em algumas secções mais esbeltas poder transitar para classe 3.

Por outro lado, esta classe de aço tem o benefício relativo à curva de encurvadura em secções comprimidas, como indicado na EN 1993-1-1, conforme o Quadro 3-19.

Quadro 3-19 – Curvas de encurvadura para perfis laminados segundo a EN 1993-1-1

Secção transversal		Limites		Encurva- dura em relação ao eixo	Curva de encurvadura	
					S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Perfis laminados		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d	c c

Para a classe S460, as curvas de encurvadura são sempre menos penalizadoras que para as outras classes, incluindo as classes S355 e S275.

Tendo em conta o estudo apresentado das 3 soluções, de seguida é apresentado o Quadro 3-20 que resume toda informação relevante para comparar as diferentes alternativas.

Quadro 3-20 – Tabela resumo de quantidades

	Peso S275 [kg]	Peso S355 [kg]	Peso S460 [kg]	Peso total [kg]	Rácio [kg/m ²]
Solução nº 1	47024	0	0	47024	31,35
Solução nº 2	16495	26708	0	43203	28,80
Solução nº 3	16945	4091	21588	42624	28,42

Uma vez que o grande objetivo é a otimização das secções metálicas e consequentemente o preço global da obra, foi analisada uma 4ª solução estrutural. Esta é uma solução que difere das anteriores apenas nas condições de apoio da estrutura, já que todos os apoios dos pilares são articulados. Para as metalomecânicas, como comercializadores de estruturas metálicas, a solução estrutural com bases articuladas não é tão interessante porque irá levar a um aumento do rácio de kg/m², já que irá conduzir a secções mais robustas, e consequentemente levar a soluções menos competitivas que aquelas que iria obter com bases rígidas. No entanto, por alguma imposição do caderno de encargos pode ser obrigatório o uso de bases de pilares que não transmitam momento fletor. Na perspetiva do dono de obra, o uso de bases articuladas, apesar de levar a um aumento do peso de aço da estrutura, irá permitir reduzir consideravelmente a dimensão das sapatas (fundações), podendo na soma das duas parcelas, ser mais rentável o uso de bases articuladas. Foi simulada uma solução deste tipo, com as secções transversais apresentadas na Figura 3-22.

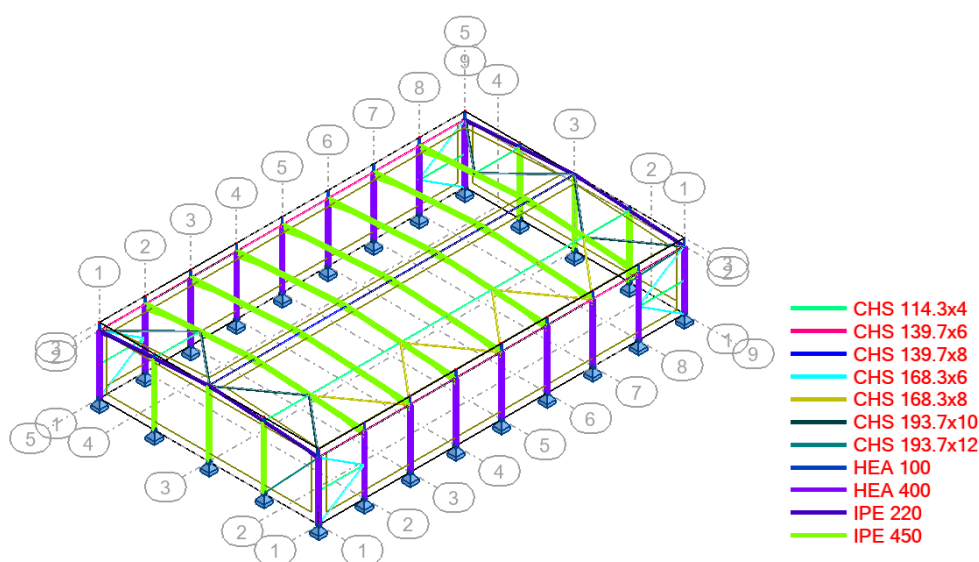


Figura 3-22 - Modelo 3D com os perfis usados na solução com bases articuladas

A solução estrutural apresentada inclui uma treliça na cobertura que fecha com diagonais nas fachadas de empena em aço da classe S275. Foi criada de forma a controlar as deformações no topo dos pilares laterais. Com um aumento de secções generalizado e com a introdução da treliça mencionada, esta solução tem um grande aumento de peso comparativamente com as outras 3 soluções já analisadas, totalizando 54831 kg com um rácio de 36,55 kg/m². Considerou-se que esta solução deixa de ser competitiva neste caso de estudo devido ao elevado peso da estrutura, e que implicaria um estudo detalhado das fundações para averiguar se poderia ainda ser uma solução rentável.

3.6.2.2 Dimensionamento ao fogo

No cálculo da ação do fogo sob este edifício industrial, optou-se por fazer o dimensionamento usando a curva do *Ozone 3*, como já tinha sido referido. No entanto, e para servir de comparação, foi feito este estudo também para a curva ISO 834.

O *Robot* permite calcular automaticamente temperaturas críticas. Foi executado esse cálculo recorrendo ao *software Robot*, para as 3 soluções, conforme a parametrização indicada na Figura 3-23.

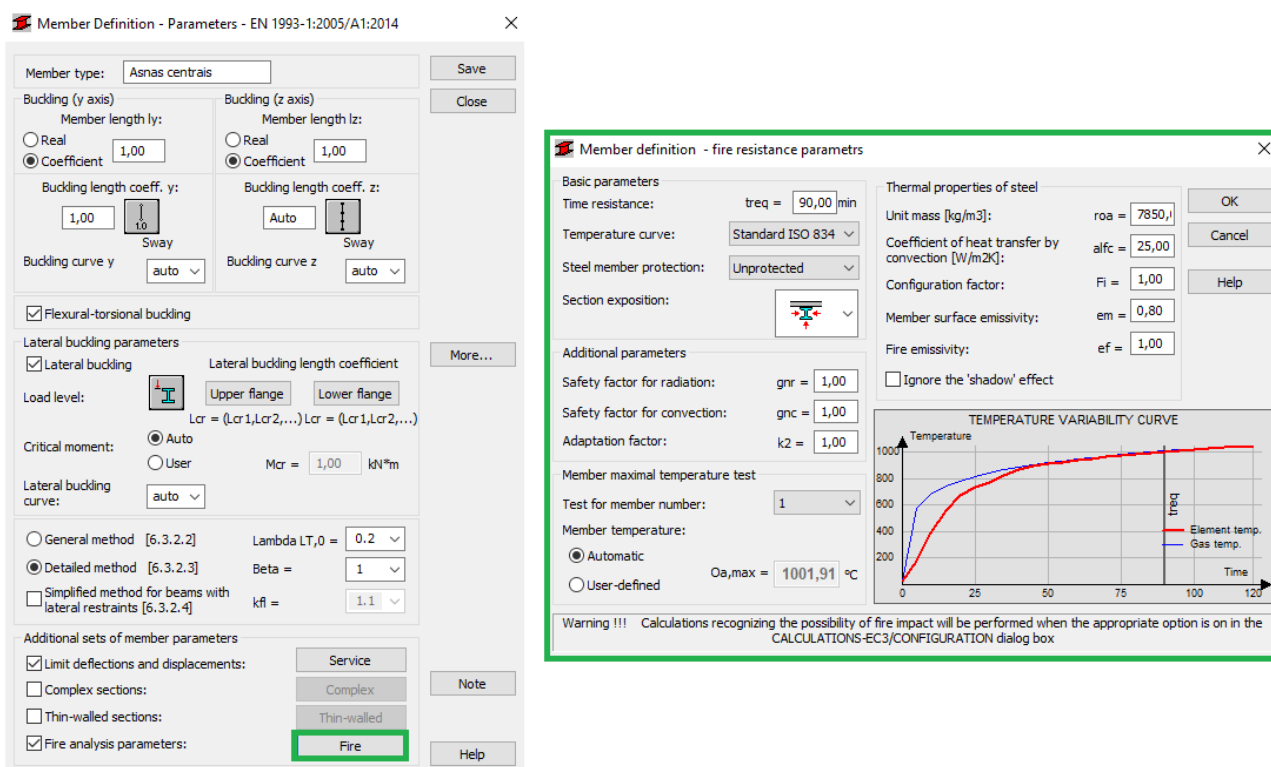


Figura 3-23 – Member type para a situação de incêndio

De assinalar que todos os pilares foram considerados com uma incidência do fogo em apenas 3 lados, uma vez que têm o painel de sandwich de fachada, e por isso aquele lado só recebe calor por condução, deixando de ser possível o aquecimento por convecção e radiação. Todos os restantes elementos foram considerados com uma incidência dos 4 lados. A temperatura crítica não depende da curva de incêndio, por isso a escolha da curva ISO 834 na parametrização não irá ter qualquer influência.

Aplicando este procedimento para as 3 soluções estruturais, foram obtidas as temperaturas críticas do Quadro 3-21 para um requisito de 90 minutos.

Quadro 3-21 – Temperaturas críticas para a curva ISO 834

Tipo de elemento	Temperatura crítica [°C]		
	Solução nº 1	Solução nº2	Solução nº 3
Pilares laterais	609	591	638
Pilares empena	743	722	772
Vigas centrais	593	600	631
Vigas empena	679	701	710
Travamentos topo pilares	698	713	686
Travamentos cumeeira	580	597	607
Travamentos diagonais cobertura	640	631	665
Travamentos diagonais fachada	605	630	664

A solução nº 3 apresenta para quase todo o tipo de elementos temperaturas críticas mais altas, o que conduzirá a menor proteção passiva a aplicar. Já a solução nº1 e 2 vão alternando entre valores maiores e menores. A temperatura crítica mais baixa corresponde aos travamentos da cumeeira na solução nº 1 de 580 °C. De acordo com o Anexo Nacional da EN 1993-1-1, em caso de omissão no projeto, deve ser considerada uma temperatura crítica de 500 °C, por isso já se percebe o quão conservador é esta simplificação.

Para a verificação das secções transversais ao fogo, apenas falta determinar as massividades dos perfis. Este é um fator geométrico, que depende da forma da secção e do número de faces exposta ao incêndio, resumido para as 3 soluções no Quadro 3-22.

Quadro 3-22 – Massividades dos perfis

Solução nº 1		Solução nº 2		Solução nº 3	
Secção	Mass. [m^{-1}]	Secção	Mass. [m^{-1}]	Secção	Mass. [m^{-1}]
HEA400	101	HEA340	112	HEA320	117
HEA240	147	HEA220	161	HEA220	161
IPE400	174	IPE400	174	IPE400	174
IPE220	254	IPE200	270	IPE200	270
CHS114,3x4	250	CHS114,3x4	250	CHS114,3x4	250
CHS139,7x8	125	CHS139,7x10	100	CHS139,7x10	100
CHS193,7x8	125	CHS193,7x8	125	CHS193,7x8	125
CHS139,7x10	100	CHS168,3x6	167	CHS168,3x6	167

A EN 1993-1-2 prevê a utilização do fator de sombra para perfis abertos. No entanto, este não foi considerado no cálculo da massividade, uma vez que as tabelas dos fabricantes das tintas intumescentes não têm em conta este fator, que poderia reduzir a massividade na ordem dos 30 a 40%. Mais uma simplificação que conduz a soluções demasiado conservadoras.

Sabendo as massividades e as temperaturas críticas é possível determinar se é necessária proteção passiva para o cumprimento dos requisitos de segurança contra incêndios. Recorrendo ao *Ozone3* (ver Figura 3-24) e recuperando a curva de incêndio determinada no subcapítulo 3.4.3.2, determinou-se a evolução da temperatura nos perfis ao longo do tempo tendo em conta os fenómenos de transmissão de calor, admitindo inicialmente que as secções não têm qualquer proteção antifogo.

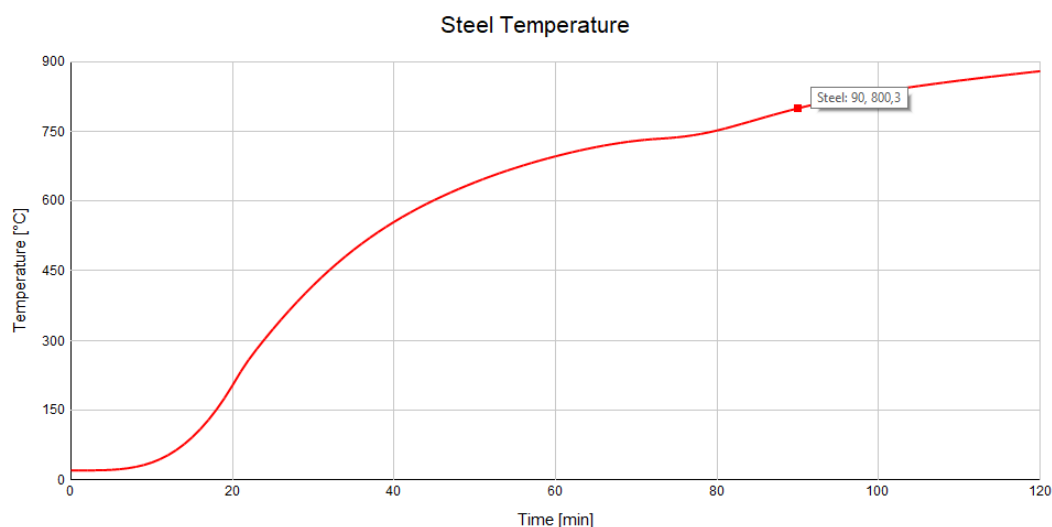


Figura 3-24 – Evolução da temperatura no pilar HEA400 da solução nº1

Para o pilar lateral da solução nº 1, decorridos 90 minutos desde o início do incêndio, o aço está a 800,3 °C, que é um valor bastante superior à temperatura crítica de 609 °C indicados no Quadro 3-21. Ou seja, este elemento não verifica a segurança contra incêndios sem proteção passiva. O mesmo método foi aplicado aos restantes elementos em análise, conforme o Quadro 3-23.

Quadro 3-23 – Temperatura crítica (θ_{cr}) vs temperatura do aço (θ_a)

Solução nº 1		Solução nº 2		Solução nº 3	
θ_{cr} [°C]	θ_a [°C]	θ_{cr} [°C]	θ_a [°C]	θ_{cr} [°C]	θ_a [°C]
609	800	591	804	607	805
743	813	722	816	720	816
593	821	600	821	631	821
679	823	701	824	785	824
698	823	713	823	726	823
580	813	597	808	598	808
640	813	631	813	632	813
605	808	630	818	634	818

Em todos os elementos, a temperatura do aço aos 90 minutos é superior à temperatura crítica, logo todos os elementos necessitam de proteção passiva, que neste estudo será a pintura intumescente. Através das tabelas dos fornecedores das tintas é possível retirar o valor das espessuras a aplicar nos diversos elementos estruturais. A espessura indicada no Quadro 3-24 corresponde apenas à camada de tinta intumescente, não tendo em conta a demão de primário e outra de acabamento, que compõem o esquema de pintura habitual nestas situações. As espessuras têm a limitação de terem por base a curva ISO 834, além da já mencionada não utilização do fator de sombra. Cada fornecedor tem as suas próprias tabelas, podendo variar consideravelmente de uns para outros. Pode ser explicado pelas propriedades térmicas da tinta poderem variar de marca para marca e também pela incerteza associada ao rendimento efetivo destas tintas quando sob a ação do fogo.

Quadro 3-24 – Espessura de tinta intumescente para R90 usando as tabelas dos fabricantes

Tipo de elemento	Espessura de tinta intumescente para R90 – ISO 834 [μm]		
	Solução nº 1	Solução nº2	Solução nº 3
Pilares laterais	733	800	800
Pilares empena	780	827	827
Vigas centrais	1006	997	964
Vigas empena	1200	1169	1169
Trav. topo pilares	3583	3626	3626
Trav. cumeeira	2891	2131	2628
Trav. diag. cobertura	2485	2496	2886
Trav. diag. fachada	2131	3294	3570

Estas seriam as espessuras a aplicar nas 3 soluções estruturais alternativas. No entanto, esta quantificação da espessura de tinta não teve em conta a curva desenvolvida no *Ozone3*, com base no desempenho, e por isso é bastante conservadora. A EN 1993-1-2 fornece expressões para o cálculo da evolução desta temperatura, tendo em consideração a proteção passiva aplicada. No entanto, para a utilização dessa expressão é necessário conhecer as propriedades térmicas da tinta, nomeadamente a massa volúmica (ρ), o calor específico (c) e condutibilidade térmica (λ). Os fornecedores de tintas não facultam estes dados mediante pedido, justificando que os valores variam bastante ao longo de um incêndio. Assim fica dificultado o processo de otimização de estruturas metálicas ao fogo, uma vez que os projetistas não possuem todos os dados para desenvolverem um projeto competitivo com base no desempenho. Para perceber qual seria o impacto destes dados estarem disponíveis aos projetistas, utilizaram-se os valores das tabelas dos fornecedores de tintas para obter uma aproximação dos valores das propriedades térmicas que estão em falta. Ou seja, sabendo a espessura indicada nas tabelas dos fornecedores, a massividade do perfil e a temperatura crítica, aferiu-se os parâmetros da tinta, através de uma relação linear. Dessa forma foi possível obter as diferenças indicadas no Quadro 3-25, para solução estrutural nº 1, fixando os valores da massa volúmica e do calor específico conforme (Mesquita, 2008)

Quadro 3-25 - Estimativa da espessura de tinta com as propriedades térmicas – Solução 1

Tipo de elemento	ρ [kg/m ³]	c [J/kg K]	λ [W/m K]	Esp. [μ m]	Diferença [%]
Pilares laterais	1600	840	0,0072	400	-45
Pilares empena			0,0106	250	-68
Vigas centrais			0,0055	550	-45
Vigas empena			0,0063	610	-49
Trav. topo pilares			0,0220	1700	-53
Trav. cumeeira			0,0210	1660	-43
Trav. diag.cobertura			0,0222	1300	-48
Trav. diag. fachada			0,0210	1200	-44

De uma outra forma, e uma vez que os valores das propriedades térmicas dos outros sistemas de proteção estão acessíveis, inclusive nos *softwares* que estão a ser utilizados nesta dissertação, admitiu-se que se iria usar placas de gesso como proteção passiva em vez da tinta intumescente, aplicadas em caixão em volta dos perfis metálicos. Determinou-se a espessura das placas de gesso para verificarem a segurança quando sujeitos a um incêndio segundo a ISO 834 e depois determinou-se a espessura das placas quando sujeitas à curva de incêndio gerada no *Ozone3*. Obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 3-26.

Quadro 3-26 – Comparação de placas de gesso entre a curva ISO 834 e a curva do *Ozone3*

Tipo de elemento	Esp. ISO 834[mm]	Esp. <i>Ozone3</i> [mm]	Diferença [%]
Pilares laterais	13	7	-46
Pilares empena	9	3	-67
Vigas centrais	22	14	-36
Vigas empena	21	12	-43
Trav. topo pilares	19	10	-47
Trav. cumeeira	18	11	-39
Trav. diag.cobertura	15	8	-47
Trav. diag. fachada	15	9	-40

Através da analogia com as placas de gesso é possível perceber a otimização que se pode atingir, entre a utilização das curvas ISO 834 e curvas com base no desempenho. No caso das placas de gesso, o ganho foi de 46% em média, que está na mesma ordem de grandeza das diferenças encontradas na relação linear que se fez anteriormente com as tabelas de dupla entrada (massividade e temperatura crítica) dos fornecedores de tintas intumescentes.

Como foi falado anteriormente, em caso de omissão muitos são os casos em que são adotados os valores da temperatura crítica indicada no Anexo Nacional da EN 1993-1-2. No Quadro 3-27 são apresentadas as diferenças de espessura de tinta que resultam dessa abordagem simplificada.

Quadro 3-27 – Comparação de espessuras de tinta com a temperatura crítica de 500 °C

Tipo de elemento	Esp. 500 °C [μm]	Esp. ISO 834 [μm]	Diferença [%]
Pilares laterais	1484	733	102
Pilares empena	1484	780	90
Vigas centrais	1484	1006	48
Vigas empena	1484	1200	24
Trav. topo pilares	3593	3583	0
Trav. cumeeira	3593	2891	24
Trav. diag. cobertura	3593	2485	45
Trav. diag. fachada	2925	2131	37

As diferenças são enormes na quantidade de tinta a aplicar, mesmo quando comparado com a abordagem prescritiva pela curva ISO 834, podendo chegar ao dobro de tinta de diferença, na solução estrutural nº 1 deste caso de estudo.

Um outro elemento de comparação que importa referir, está relacionado com o requisito ao fogo. Como se viu no subcapítulo 3.4.3.1, o requisito ao fogo de R90 estava empolado, podendo ser aplicado o critério R60. Depois de se verificar, que ainda assim nenhum dos elementos verificava a segurança sem proteção passiva, foram determinadas as espessuras de tinta pelas tabelas dos fornecedores para a curva ISO 834 para as 3 soluções estruturais, conforme o Quadro 3-28.

Quadro 3-28 - Espessura de tinta intumescente para R60 usando as tabelas dos fabricantes

Tipo de elemento	Espessura de tinta intumescente para R60 – ISO 834 [μm]		
	Solução nº 1	Solução nº2	Solução nº 3
Pilares laterais	312	413	398
Pilares empena	342	365	365
Vigas centrais	701	678	569
Vigas empena	844	669	669
Trav. topo pilares	1082	1082	1082
Trav. cumeeira	1039	717	839
Trav. diag. cobertura	717	717	906
Trav. diag. fachada	717	1135	1135

Em média, a redução do requisito ao fogo para R60, reduziu 57% da espessura de tinta intumescente a aplicar, de acordo com as tabelas dos fornecedores da tinta. Assim é possível entender a necessidade de serem calculados corretamente os requisitos ao fogo de uma obra, porque o impacto nos custos finais é significativo, numa solução em estrutura metálica.

Nesta análise ao fogo, foi também considerada a hipótese de encontrar uma solução estrutural em que não fosse necessário aplicar qualquer tipo de proteção passiva. Uma vez que a necessidade de proteção passiva depende unicamente da massividade e da temperatura crítica, optou-se por subir duas secções em todos perfis da solução estrutural nº 1, em aço S275. Escolheu-se a solução da classe S275 porque tem perfis com massividade maior. No entanto, mesmo com a subida generalizada de secções, as temperaturas do aço sem proteção são sempre superiores à temperatura crítica, para um critério de R90. Mesmo para R60, também não houve elementos a verificarem a segurança.

3.6.2.3 Fundações

Para este caso de estudo, foi feita uma estimativa das fundações a aplicar neste tipo de construção. A informação que era dada à partida era podiam ser executadas sapatas isoladas, sem recurso a estacas ou outros métodos similares. Essas sapatas isoladas são todas ligadas por vigas de fundação, de forma dar uma estabilidade adicional às sapatas.

Uma vez que não é o objetivo desta dissertação, o dimensionamento de fundações, apenas foi feita uma estimativa das dimensões e quantidades de material utilizado, para depois de contabilizar custos e assim comparar as soluções estruturais de maneira mais fidedigna. Por isso apenas serão apresentadas a geometria de uma sapata tipo, quantificar todos os materiais utilizados e dar nota de alguma consideração de relevo.

A regulamentação aplicável no dimensionamento de sapatas é a EN 1992-1-1 e a EN 1997-1.

Este pré-dimensionamento foi feito com recurso ao Robot que faz as verificações de segurança automaticamente. A dimensão adotada está representada na Figura 3-25.

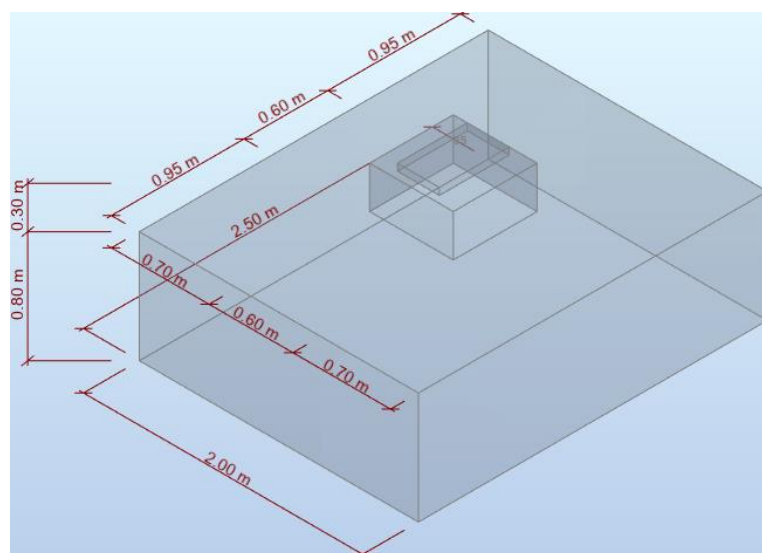


Figura 3-25 – Dimensões das sapatas

Daqui resultaram as quantidades descritas no Quadro 3-29, sendo também contabilizada as vigas de fundação que unem as sapatas.

Quadro 3-29 – Quadro resumo dos materiais das sapatas e vigas de fundação

Betão [m ³]	Aço [kg]	Cofragem [m ²]
124	9300	372

3.7 Custos

Após determinar todos os pesos das diversas soluções estruturais, incluindo fundações, e todas as variantes de espessuras de tinta intumescente, quantificam-se os custos para ser encontrada a solução mais económica em aço, para comparar com a solução de betão pré-fabricado inicialmente apresentada.

Estes custos aqui apresentados são equivalentes aos orçamentos que são enviados no dia-a-dia pelas metalomecânicas comercializadoras de estruturas metálicas. Estes custos incluem

também a margem comercial, tal como se fosse uma cotação entregue a um potencial cliente. Só assim é que se pode fazer uma comparação fidedigna com a solução em betão pré-fabricado.

O ano de 2021, em resultado da pandemia que assolou todo o mundo, verificou-se uma flutuação de preços das matérias-primas, que também teve repercussão no setor da construção, e em especial no setor das estruturas metálicas. Por isso, é importante enquadrar o preço no tempo, para que seja possível fazer uma comparação correta, já que a obra foi adjudicada no início do ano. Os dois materiais (o aço e o betão) tiveram aumentos diferentes de preço desde o início de 2021 (ver flutuação do aço na Figura 3-26). Por isso, na apresentação dos preços das várias soluções será considerado um preço no início de 2021 e outro da 2ª metade do ano, para desta forma também se perceber a dinâmica dos preços das duas soluções.



Figura 3-26 – Flutuação dos preços do aço em 2021 – *Trading Economics* (Economics, 2021)
A estrutura em betão pré-fabricado inclui estrutura principal, madres de cobertura e fundações. Também inclui um “acréscimo de cobertura”, porque para fixar painel de cobertura sobre vigas de betão-pré-fabricado exige-se um trabalho adicional, que nas madres metálicas não tem (ver Quadro 3-30).

Quadro 3-30 – Preço da solução de betão pré-fabricado

Elemento	Solução em betão pré-fabricado	
	Início 21	2º sem. 21
Estrutura	80.000 €	88.000 €
Madres cob.		
Acréscimo cob.	2.115 €	2.115 €
Intumescente	-	-
Fundações	60.000 €	66.000 €
Total	142.115 €	156.115 €

O preço para o intumescente é igual a 0 porque não tem aplicada nenhuma proteção passiva.

O preço a apresentar da solução em aço tem de incluir os mesmos artigos, para as 3 diferentes soluções estruturais consideradas, conforme o Quadro 3-31.

Quadro 3-31 – Preço das soluções em aço para R90

Elemento	1ª solução		2ª solução		3ª solução	
	Início 21	2º sem. 21	Início 21	2º sem. 21	Início 21	2º sem. 21
Estrutura	76.468 €	97.199 €	76.114 €	95.379 €	78.333 €	96.959 €
Madres cob.	11.033 €	14.245 €	11.033 €	14.245 €	11.033 €	14.245 €
Acréscimo cob.	-	-	-	-	-	-
Intumescente	27.830 €	29.227 €	29.604 €	31.082 €	30.038 €	31.552 €
Fundações	32.668 €	35.935 €	32.668 €	35.935 €	32.668 €	35.935 €
Total	148.001 €	176.605 €	149.417 €	176.641 €	152.072 €	178.691 €

Entre as 3 soluções, a solução mais económica no início de 2021 é a solução nº 1, com o aço da classe S275. Ou seja, este era o preço que podia competir no momento em que estavam para adjudicar a obra. Se fosse no dia de hoje, a solução nº 2 estava muito parecida à solução nº 1. Isto acontece porque, com o aumento do custo unitário de aço durante 2021, é mais valorizada a solução que tem menor peso em aço. No entanto, nenhuma destas soluções em qualquer espaço temporal, supera os custos para a solução de betão pré-fabricado. Sendo que a partir do 2ª semestre a diferença aumentou bastante entre os dois materiais, em prejuízo do aço. O preço unitário do aço teve um incremento na ordem dos 35%, já o betão aumentou qualquer coisa como 10%.

Se a obra tivesse um requisito de R60, tal como foi abordado anteriormente, as soluções de aço apresentavam o preço do Quadro 3-32.

Quadro 3-32 - Preço das soluções em aço para R60

Elemento	1ª solução		2ª solução		3ª solução	
	Início 21	2º sem. 21	Início 21	2º sem. 21	Início 21	2º sem. 21
Estrutura	76.468 €	97.199 €	76.114 €	95.379 €	78.333 €	96.958 €
Madres cob.	11.033 €	14.245 €	11.033 €	14.245 €	11.033 €	14.245 €
Acréscimo cob.	-	-	-	-	-	-
Intumescente	15.051 €	15.805 €	16.190 €	16.997 €	14.877 €	15.625 €
Fundações	32.668 €	35.935 €	32.668 €	35.935 €	32.668 €	35.935 €
Total	135.221 €	163.184 €	136.006 €	162.556 €	136.911 €	162.764 €

No início de 2021, os preços em todas as soluções são muito semelhantes, mas ainda com primazia para a solução em aço S275. Já no 2º semestre, com o aumento do custo unitário do aço, as classes de aço mais elevadas ganham uma pequena vantagem. Admitindo que as secções de pré-fabricado de betão para o requisito de R60 são exatamente as mesmas que as de R90, ou seja, com o mesmo preço também, no início de 2021 a solução em aço tinha um preço mais competitivo, mas com o avançar do ano, a solução em betão tornou-se novamente a mais económica.

Tendo em conta todas as variantes estudadas, apresenta-se o Quadro 3-33 com os parciais do custo da tinta intumescente.

Quadro 3-33 – Custo com a tinta intumescente

Caso	Custo da tinta intumescente	
	Início 21	2º sem. 21
Solução nº 1 – Tabelas (ISO 834) – R90	27.831 €	29.227 €
Solução nº 1 – Tabelas (ISO 834) – R60	15.051 €	15.805 €
Solução nº 2 – Tabelas (ISO 834) – R90	29.604 €	31.082 €
Solução nº 2 – Tabelas (ISO 834) – R60	16.191 €	16.997 €
Solução nº 3 – Tabelas (ISO 834) – R90	30.038 €	31.552 €
Solução nº 3 – Tabelas (ISO 834) – R60	14.877 €	15.625 €
Solução nº 1 – 500 °C – R90	39.639 €	41.616 €
Solução nº 1 – Aproximação linear – R90	15.745 €	16.534 €
Solução nº 1 – Placas de gesso -R90	16.499 €	17.323 €

Analisando as parcelas do custo da aplicação da tinta intumescente para os diversos casos referidos no subcapítulo 3.6.2.2, percebe-se que usando as tabelas dos fornecedores de tinta pela ISO 834, este custo é mais reduzido para a solução nº 1, que corresponde à solução com perfis com menor massividade (perfis mais robustos). Comparando as soluções com requisito de R90 com R60, tem-se uma poupança de 50%, aproximadamente. Se fosse considerada a simplificação de assumir temperaturas críticas de 500 °C, o preço para a aplicação da tinta, subia na ordem dos 42% relativamente às espessuras determinadas com a curva ISO 834. Por outro lado, as aproximações que se fizeram para obter as espessuras de tinta com base no desempenho, quer pela aproximação linear dos valores tabelados, quer pela comparação com as placas de gesso, poderiam levar a uma redução de quase metade dos custos na aplicação de proteção passiva.

3.8 Análise de ciclo de vida

Sobre os materiais que estão em análise nesta dissertação, *à priori* o aço é a solução mais sustentável ambientalmente comparativamente ao betão. Mas como foi referido no subcapítulo 2.5, a sustentabilidade contempla também os aspetos económicos e sociais, que podem equilibrar a balança na avaliação da sustentabilidade das duas soluções.

Para uma comparação adequada das soluções de aço e betão, definiram-se unidades idênticas para comparação.

Numa fase seguinte, foram determinadas as quantidades relevantes para a Análise de Ciclo de Vida. Isto inclui todos os elementos que diferem de uma solução para a outra, nomeadamente a estrutura principal e as madres de cobertura. Apesar de haver diferenças no revestimento de fachada, de uma solução para a outra, esta não foi considerada nesta análise. Para o betão foram discriminadas as quantidades de betão e armadura. Já para o aço foram consideradas as quantidades de aço dos perfis estruturais, betão e armaduras (das fundações).

Foi considerada uma análise “*cradle to gate*”, que inclui todos os impactos ambientais desde a extração da matéria-prima até ao fim da sua produção à porta da fábrica. Não foi considerada uma abordagem mais completa, como a “*cradle to grave*”, uma vez que não existem muitas informações sobre a utilização do edifício, tornando mais difícil quantificar.

Os indicadores usados para a Análise de Ciclo de Vida, podem ser usados para determinar os desempenhos ambientais, económicos ou sociais (Pinheiro, 2012):

- indicadores ambientais - essencialmente o consumo de energia, as emissões nocivas para a atmosfera e a contribuição para o fim dos recursos naturais. Estes indicadores tem a unidade funcional de 1 kg;
- indicadores económicos – uma vez que a análise é “*cradle to gate*”, só irá ser contabilizado o custo de produção / construção, conforme o subcapítulo 3.7;
- indicadores sociais – para este tipo de análise não foi considerada por ser uma análise qualitativa

De acordo com procedimento apresentado anteriormente, a primeira etapa consiste em quantificar as quantidades dos materiais utilizados, de acordo com o Quadro X para a solução estrutural nº 1.

Quadro 3-34 – Quantidades de material

Quantidades	Betão	Aço estrutural	Aço em varão
Solução em betão	500000 kg	-	21800 kg
Solução em aço	200000 kg	47024 kg	6000 kg

O cálculo dos impactes ambientais foi executado com base nos seguintes desempenhos ambientais da Figura 3-27, com os resultados apresentados no Quadro 3-35 e Quadro 3-36.

MATERIAIS	CATEGORIA	PARÂMETRO	UNIDADE	BETÃO (Kg)	AÇO EM VARÃO (Kg)	AÇO EM PERFIL (Kg)
IMPACTOS AMBIENTAIS	CONSUMO DE ENERGIA	Energia Renovável Incorporada (ER)	MJ equiv	6,24E-03	1,52E-01	1,16E-01
		Energia não-Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	5,56E-01	3,27E+01	8,66E+00
	EMISSIONES ATMOSFÉRICAS (AQUECIMENTO GLOBAL)	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	kg CO2 equiv	1,10E-01	1,25E+00	5,71E-01
		Potencial de Destruição do Ozono (ODP)	kg CFC 11 equiv	3,55E-09	6,16E-08	5,40E-08
		Potencial de Acidificação (AP)	kg SO2- equiv	1,79E-04	5,57E-03	3,04E-03
		Potencial de Eutrofização (EP)	kg (PO4)3- equiv	2,84E-05	1,30E-03	4,86E-04
		Potencial de formação de Ozono Troposférico (POCP)	kg Ethene equiv	6,49E-06	8,29E-04	1,85E-04
	ESGOTAMENTO DE RECURSOS	Potencial de esgotamento de recursos abióticos (ADP)	kg Sb equiv	2,38E-04	1,29E-02	4,54E-03
		Energia não-Renovável Incorporada (ENR)	MJ equiv	5,56E-01	3,27E+01	8,66E+00

Figura 3-27 – Indicadores ambientais (Roma, 2012)

Quadro 3-35 – Indicadores ambientais para a solução em betão

Categoria	Parâmetro	Unidade	Betão	Aço est.	Aço var
Consumo de energia	ER	MJ equi	3120	-	3313,6
	ENR	MJ equi	278000	-	712860
Emissões atmosféricas	GWP	kg CO ₂ equi	55000	-	27250
	ODP	kg CFC11 equi	0,0018	-	0,0013
	AP	kg SO ₂ equi	89,5	-	121,43
	EP	kg PO ₄ equi	14,2	-	28,34
	POCP	kg Ethene equi	3,25	-	18,07
Esgotamento de recursos	ADP	kg Sb equi	119	-	281,22
	ENR	MJ equi	278000	-	712860

Quadro 3-36 – Indicadores ambientais para a solução em aço

Categoria	Parâmetro	Unidade	Betão	Aço est.	Aço var
Consumo de energia	ER	MJ equi	1248	5454,78	912
	ENR	MJ equi	111200	407228	196200
Emissões atmosféricas	GWP	kg CO ₂ equi	22000	26850,7	7500
	ODP	kg CFC11 equi	0,00071	0,0025	0,00037
	AP	kg SO ₂ equi	35,8	142,95	33,42
	EP	kg PO ₄ equi	5,68	22,85	7,8
	POCP	kg Ethene equi	1,298	8,69	4,97
Esgotamento de recursos	ADP	kg Sb equi	47,6	213,5	77,4
	ENR	MJ equi	111200	407228	196200

Em quase todos os parâmetros ambientais analisados, a solução em aço estrutural apresenta melhores desempenhos.

4 CONCLUSÕES

O pavilhão industrial é uma tipologia de obra bastante importante no setor da construção, tanto para as estruturas metálicas, como as estruturas em betão. O seu estudo detalhado é fundamental para tornar competitivas as soluções no mercado. Atualmente, para esta tipologia de obra, as estruturas em aço estão em quebra relativamente às de betão para requisitos ao fogo elevados, devido ao grande aumento de preços do aço em 2021. Com a crise energética que se avizinha, os dois tipos de materiais poderão ver os preços revistos num futuro próximo, tendo de encontrar novas formas de promover e otimizar o seu produto.

Quanto às diferentes classes do aço que podem ser aplicadas numa solução estrutural metálica num pavilhão industrial, a classe S275 continua a ser uma boa escolha, uma vez que permite obter uma solução económica e com disponibilidade do mercado de matéria-prima imediata a nível nacional. Em elementos condicionados pela deformação, como por exemplo as vigas de cobertura, ou pilares com bases articuladas, o aço da classe S275 ganha bastante vantagem relativamente aos restantes. No entanto, e tendo em conta a flutuação dos preços das matérias-primas em 2021, a poupança de 1 kg numa otimização estrutural tem maior significado agora do que em 2020, porque o preço unitário do aço aumentou consideravelmente. Nessa perspetiva, os aços de maior classe de resistência, podem levar a soluções mais competitivas. E se esta tendência de crescimento do preço das matérias-primas continuar, maior viabilidade terão as estruturas com classe de aço mais elevadas. Com base no caso de estudo, para que seja rentável o aumento da classe de resistência do aço, terá de produzir uma redução de duas secções, como aconteceu nos pilares laterais, que era uma secção HEA400 em S275 e passou a HEA340 em aço S355. Já da classe S355 para S460 desceu apenas uma secção para HEA320, e aí a rentabilidade já não justifica a utilização deste tipo de aço.

O dimensionamento ao fogo condiciona bastante a solução metálica, como ficou provado no caso de estudo apresentado. Com os preços das matérias-primas praticados na 2ª metade de 2021, a solução em aço deixa de ser competitiva com a solução em pré-fabricados de betão, para um requisito de R90. A solução em aço para o critério R90 só seria mais vantajosa economicamente, com os preços praticados no início deste ano e com uma otimização da espessura da tinta intumescente usando uma abordagem com base no desempenho. Mas como a tendência aparenta ser de subida dos preços, para o critério R90 deixa de ser viável para a solução em aço, nem com esse tipo de abordagens mais minuciosas. No entanto, para requisitos R60 a solução em aço pode ser competitiva com o betão mas somente usando uma abordagem com base no desempenho, deixando de se utilizar a abordagem prescritiva com base na ISO

834. Ou seja, teriam de haver algumas mudanças nas práticas do dimensionamento ao fogo e dos seus intervenientes, tais como: o requisito ao fogo não pode ser conservador (para pavilhões industriais de um único piso é possível provar que o requisito é R60); as temperaturas críticas devem ser calculadas pelos projetistas para não ser utilizada a temperatura de 500 °C por omissão; e principalmente, a falta de informação / transparência relativamente ao cálculo das espessuras de tinta intumescente por parte dos fornecedores de tintas, onde há uma total ocultação das propriedades térmicas das tintas (ao contrário do que acontece com os outros materiais de proteção passiva), não sendo possível usar abordagens com base no desempenho, nem incorporar o fator de sombra no cálculo das massividades. Importa referir também, e cruzando com o primeiro tema abordado neste capítulo, que as secções menos esbeltas (com menor massividade) têm menor necessidade de aplicação de proteção passiva, ou seja, as soluções mais pesadas permitem algum ganho na proteção contra o fogo, que neste caso de estudo seria a solução estrutural em S275. Usando o mesmo fundamento, não se conseguiu dispensar o uso de proteção passiva quando se aumentou secções, para os requisitos R90 e R60.

Relativamente à avaliação da sustentabilidade, as duas soluções apresentaram resultados que já se esperavam, em que se demonstrou que a solução em aço ambientalmente não é tão prejudicial como a de betão. Numa atualidade cada vez mais dominada por assuntos relacionadas com o ambiente e sustentabilidade, não irá demorar a obrigatoriedade de análises de ciclo de vida a acompanhar o projeto estrutural. Nesse tema, o aço tem espaço para recuperar algum espaço que tem perdido para os pré-fabricados de betão devido ao aumento dos preços das matérias-primas.

ANEXOS

Caso / Combinação	Combinação													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
101	ULS: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + X+	1,35	1,35	1,50		0,90				0,90	1,35			
102	ULS: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	1,50		0,90				0,90		1,35		
103	ULS: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + X+	1,35	1,35	1,50			0,90			0,90	1,35			
104	ULS: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	1,50			0,90			0,90		1,35		
105	ULS: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + X+	1,35	1,35	1,50				0,90		0,90	1,35			
106	ULS: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	1,50				0,90		0,90		1,35		
107	ULS: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + X+	1,35	1,35	1,50					0,90	0,90	1,35			
108	ULS: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	1,50					0,90	0,90		1,35		
109	ULS: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + X+	1,35	1,35		1,50				0,90		1,35		1,50	
110	ULS: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + Y+	1,35	1,35		1,50				0,90			1,35		1,50
111	ULS: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + X+	1,35	1,35		1,50					0,90	1,35		1,50	
112	ULS: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + Y+	1,35	1,35		1,50					0,90		1,35		1,50
113	ULS: PP + RCP + W0P + 0,6TV + X+	1,35	1,35			1,50			0,90		1,35			
114	ULS: PP + RCP + W0P + 0,6TV + Y+	1,35	1,35			1,50			0,90			1,35		
115	ULS: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,35	1,35	0,75		1,50				0,90	1,35			
116	ULS: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	0,75		1,50				0,90		1,35		
117	ULS: PP + RCP + W0S + 0,6TV + X+	1,00	1,00				1,50			0,90		1,00		
118	ULS: PP + RCP + W0S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00				1,50			0,90			1,00	
119	ULS: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,75			1,50				0,90	1,00		
120	ULS: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,75			1,50				0,90		1,00	
121	ULS: PP + RCP + W90P + 0,6TV + X+	1,35	1,35					1,50		0,90		1,35		
122	ULS: PP + RCP + W90P + 0,6TV + Y+	1,35	1,35					1,50		0,90			1,35	
123	ULS: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,35	1,35	0,75				1,50			0,90	1,35		
124	ULS: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,35	1,35	0,75				1,50			0,90		1,35	
125	ULS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + X+	1,00	1,00						1,50	0,90		1,00		
126	ULS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00						1,50	0,90			1,00	
127	ULS: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,75					1,50		0,90	1,00		
128	ULS: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,75					1,50		0,90		1,00	
129	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W0P + X+	1,35	1,35			0,90				1,50		1,35		
130	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W0P + Y+	1,35	1,35			0,90				1,50			1,35	
131	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W0S + X+	1,35	1,35				0,90			1,50		1,35		
132	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W0S + Y+	1,35	1,35				0,90			1,50			1,35	
133	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W90P + X+	1,35	1,35					0,90		1,50		1,35		
134	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W90P + Y+	1,35	1,35					0,90		1,50			1,35	
135	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W90S + X+	1,35	1,35						0,90	1,50		1,35		
136	ULS: PP + RCP + TV + 0,6W90S + Y+	1,35	1,35						0,90	1,50			1,35	
137	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W0P + X+	1,35	1,35	0,75		0,90					1,50	1,35		
138	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W0P + Y+	1,35	1,35	0,75		0,90					1,50		1,35	
139	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W0S + X+	1,35	1,35	0,75			0,90				1,50	1,35		
140	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W0S + Y+	1,35	1,35	0,75			0,90				1,50		1,35	
141	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W90P + X+	1,35	1,35	0,75				0,90			1,50	1,35		
142	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W90P + Y+	1,35	1,35	0,75				0,90			1,50		1,35	
143	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W90S + X+	1,35	1,35	0,75					0,90		1,50	1,35		
144	ULS: PP + RCP + TI + 0,5S+ 0,6W90S + Y+	1,35	1,35	0,75					0,90		1,50		1,35	

Caso / Combinação	Combinação														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		PP	RCP	Neve	Qsob	W0 pressão	W0 sucção	W90 pressão	W90 sucção	Temp V	Temp I	Notional loads P X+	Notional loads P Y+	Notional loads Q X+	Notional loads Q Y+
201	SLS: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + X+	1,00	1,00	1,00		0,60					0,90	1,00			
202	SLS: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	1,00		0,60					0,90		1,00		
203	SLS: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	1,00			0,60				0,90	1,00			
204	SLS: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	1,00			0,60				0,90		1,00		
205	SLS: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + X+	1,00	1,00	1,00				0,60			0,90	1,00			
206	SLS: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	1,00				0,60			0,90		1,00		
207	SLS: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	1,00					0,60		0,90	1,00			
208	SLS: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	1,00					0,60		0,90		1,00		
209	SLS: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + X+	1,00	1,00		1,00					0,60		1,00		1,00	
210	SLS: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + Y+	1,00	1,00		1,00					0,60		1,00		1,00	1,00
211	SLS: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + X+	1,00	1,00		1,00						0,60	1,00		1,00	
212	SLS: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + Y+	1,00	1,00		1,00						0,60		1,00		1,00
213	SLS: PP + RCP + W0P + 0,6TV + X+	1,00	1,00			1,00				0,60		1,00			
214	SLS: PP + RCP + W0P + 0,6TV + Y+	1,00	1,00			1,00				0,60			1,00		
215	SLS: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,50		1,00					0,60	1,00			
216	SLS: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,50		1,00					0,60		1,00		
217	SLS: PP + RCP + W0S + 0,6TV + X+	1,00	1,00				1,00			0,60		1,00			
218	SLS: PP + RCP + W0S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00				1,00			0,60			1,00		
219	SLS: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,50			1,00				0,60	1,00			
220	SLS: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,50			1,00				0,60		1,00		
221	SLS: PP + RCP + W90P + 0,6TV + X+	1,00	1,00					1,00		0,60		1,00			
222	SLS: PP + RCP + W90P + 0,6TV + Y+	1,00	1,00					1,00		0,60			1,00		
223	SLS: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,50				1,00			0,60	1,00			
224	SLS: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,50				1,00			0,60		1,00		
225	SLS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + X+	1,00	1,00						1,00	0,60		1,00			
226	SLS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00						1,00	0,60			1,00		
227	SLS: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,50					1,00		0,60	1,00			
228	SLS: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,50					1,00		0,60		1,00		
229	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W0P + X+	1,00	1,00			0,60				1,00		1,00			
230	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W0P + Y+	1,00	1,00			0,60				1,00			1,00		
231	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W0S + X+	1,00	1,00				0,60			1,00		1,00			
232	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W0S + Y+	1,00	1,00				0,60			1,00			1,00		
233	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W90P + X+	1,00	1,00					0,60		1,00		1,00			
234	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W90P + Y+	1,00	1,00					0,60		1,00			1,00		
235	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W90S + X+	1,00	1,00						0,60	1,00		1,00			
236	SLS: PP + RCP + TV + 0,6W90S + Y+	1,00	1,00						0,60	1,00			1,00		
237	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0P + X+	1,00	1,00	0,50		0,60					1,00	1,00			
238	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0P + Y+	1,00	1,00	0,50		0,60					1,00		1,00		
239	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0S + X+	1,00	1,00	0,50			0,60				1,00	1,00			
240	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0S + Y+	1,00	1,00	0,50			0,60				1,00		1,00		
241	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90P + X+	1,00	1,00	0,50				0,60			1,00	1,00			
242	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90P + Y+	1,00	1,00	0,50				0,60			1,00		1,00		
243	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90S + X+	1,00	1,00	0,50					0,60		1,00	1,00			
244	SLS: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90S + Y+	1,00	1,00	0,50					0,60		1,00		1,00		

Caso / Combinação	Combinação														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		PP	RCP	Neve	Qsob	W0 pressão	W0 sucção	W90 pressão	W90 sucção	Temp V	Temp I	Notional loads P X+	Notional loads P Y+	Notional loads Q X+	Notional loads Q Y+
301	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,20		0,00					0,00	1,00			
302	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W0P + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,20		0,00					0,00		1,00		
303	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,20			0,00				0,00	1,00			
304	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W0S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,20			0,00				0,00		1,00		
305	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,20				0,00			0,00	1,00			
306	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W90P + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,20				0,00			0,00		1,00		
307	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,20					0,00		0,00	1,00			
308	FOGO: PP + RCP + S + 0,6W90S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,20						0,00	0,00		1,00		
309	FOGO: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + X+	1,00	1,00		0,00					0,00		1,00		0,00	
310	FOGO: PP + RCP + Qsob + 0,6TV + Y+	1,00	1,00		0,00					0,00			1,00		0,00
311	FOGO: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + X+	1,00	1,00		0,00						0,00	1,00		0,00	
312	FOGO: PP + RCP + Qsob + 0,6TI + Y+	1,00	1,00		0,00						0,00		1,00		0,00
313	FOGO: PP + RCP + W0P + 0,6TV + X+	1,00	1,00			0,20				0,00		1,00			
314	FOGO: PP + RCP + W0P + 0,6TV + Y+	1,00	1,00			0,20				0,00			1,00		
315	FOGO: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,00		0,20					0,00	1,00			
316	FOGO: PP + RCP + W0P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,00		0,20					0,00		1,00		
317	FOGO: PP + RCP + W0S + 0,6TV + X+	1,00	1,00				0,20			0,00		1,00			
318	FOGO: PP + RCP + W0S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00				0,20			0,00			1,00		
319	FOGO: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,00			0,20				0,00	1,00			
320	FOGO: PP + RCP + W0S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,00			0,20				0,00		1,00		
321	FOGO: PP + RCP + W90P + 0,6TV + X+	1,00	1,00					0,20		0,00		1,00			
322	FOGO: PP + RCP + W90P + 0,6TV + Y+	1,00	1,00					0,20		0,00			1,00		
323	FOGO: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,00				0,20			0,00	1,00			
324	FOGO: PP + RCP + W90P + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,00				0,20			0,00		1,00		
325	FOGO: PP + RCP + W90S + 0,6TV + X+	1,00	1,00						0,20	0,00		1,00			
326	FOGO: PP + RCP + W90S + 0,6TV + Y+	1,00	1,00						0,20	0,00			1,00		
327	FOGO: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + X+	1,00	1,00	0,00					0,20		0,00	1,00			
328	FOGO: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + Y+	1,00	1,00	0,00					0,20		0,00		1,00		
329	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W0P + X+	1,00	1,00			0,00				0,50		1,00			
330	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W0P + Y+	1,00	1,00			0,00				0,50			1,00		
331	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W0S + X+	1,00	1,00				0,00			0,50		1,00			
332	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W0S + Y+	1,00	1,00				0,00			0,50			1,00		
333	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W90P + X+	1,00	1,00					0,00		0,50		1,00			
334	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W90P + Y+	1,00	1,00					0,00		0,50			1,00		
335	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W90S + X+	1,00	1,00						0,00	0,50		1,00			
336	FOGO: PP + RCP + TV + 0,6W90S + Y+	1,00	1,00						0,00	0,50			1,00		
337	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0P + X+	1,00	1,00	0,00		0,00					0,50	1,00			
338	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0P + Y+	1,00	1,00	0,00		0,00					0,50		1,00		
339	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0S + X+	1,00	1,00	0,00			0,00				0,50	1,00			
340	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W0S + Y+	1,00	1,00	0,00			0,00				0,50		1,00		
341	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90P + X+	1,00	1,00	0,00				0,00			0,50	1,00			
342	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90P + Y+	1,00	1,00	0,00				0,00			0,50		1,00		
343	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90S + X+	1,00	1,00	0,00					0,00		0,50	1,00			
344	FOGO: PP + RCP + TI + 0,5S + 0,6W90S + Y+	1,00	1,00	0,00					0,00		0,50		1,00		

CODE: EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 32 Pilares laterais_32 POINT: 11

COORDINATE: x=1.00 L=8.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 126 ULS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + Y+ (1+2+12)*1.00+8*1.50+9*0.90

MATERIAL:

S 275 (S 275) $f_y = 275.00$ MPa



SECTION PARAMETERS: HEA 400

h=39.0 cm	$gM0=1.00$	$gM1=1.00$	
b=30.0 cm	$A_y=126.20$ cm ²	$A_z=57.33$ cm ²	$A_x=158.98$ cm ²
tw=1.1 cm	$I_y=45069.40$ cm ⁴	$I_z=8563.83$ cm ⁴	$I_x=191.00$ cm ⁴
tf=1.9 cm	$W_{ply}=2561.97$ cm ³	$W_{plz}=872.88$ cm ³	

INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

$N_{Ed} = -143.26$ kN	$M_{y,Ed} = 655.81$ kN*m	$M_{z,Ed} = 0.01$ kN*m	$V_{y,Ed} = -0.00$ kN
$N_{t,Rd} = 4371.90$ kN	$M_{y,pl,Rd} = 704.54$ kN*m	$M_{z,pl,Rd} = 240.04$ kN*m	$V_{y,T,Rd} = 2003.20$ kN
	$M_{y,c,Rd} = 704.54$ kN*m	$M_{z,c,Rd} = 240.04$ kN*m	$V_{z,Ed} = 176.12$ kN
	$MN_{y,Rd} = 704.54$ kN*m	$MN_{z,Rd} = 240.04$ kN*m	$V_{z,T,Rd} = 910.08$ kN
	$Mb,Rd = 704.54$ kN*m		$T_{t,Ed} = 0.01$ kN*m
			Class of section = 1



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

z = 1.00	$M_{cr} = 56896.15$ kN*m	Curve _{LT} = b	$X_{LT} = 1.00$
$L_{cr,upp} = 0.80$ m	$\lambda_{m,LT} = 0.11$	$\eta_{LT} = 0.49$	$X_{LT,mod} = 1.00$

BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:



About z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$N_{Ed}/N_{t,Rd} = 0.03 < 1.00$ (6.2.3.(1))
$M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd} = 0.93 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
$M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^2 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^2 = 0.87 < 1.00$ (6.2.9.1.(6))
$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.19 < 1.00$ (6.2.6-7)
$\tau_{xy,Ed}/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00$ (6.2.6)
$\tau_{xz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00$ (6.2.6)
Global stability check of member:
$M_{y,Ed}/M_{b,Rd} = 0.93 < 1.00$ (6.3.2.1.(1))

Section OK !!!

CODE: EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 24 Asnas centrais_24 POINT: 2

COORDINATE: x=0.02 L=0.38 m

LOADS:

Governing Load Case: 126 ULS: PP + RCP + W90S + 0,6TV + Y+ (1+2+12)*1.00+8*1.50+9*0.90

MATERIAL:

S 275 (S 275) $f_y = 275.00$ MPa



SECTION PARAMETERS: IPE 400

h=72.4 cm	gM0=1.00	gM1=1.00	
b=18.0 cm	Ay=48.60 cm ²	Az=59.94 cm ²	Ax=135.47 cm ²
tw=0.9 cm	Iy=88082.80 cm ⁴	Iz=1975.57 cm ⁴	Ix=67.33 cm ⁴
tf=1.4 cm	Wply=2771.00 cm ³	Wplz=231.59 cm ³	

INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

N _{Ed} = -200.10 kN	M _{y,Ed} = 599.37 kN*m	M _{z,Ed} = 0.00 kN*m	V _{y,Ed} = 0.00 kN
N _{t,Rd} = 3725.33 kN	M _{y,pl,Rd} = 762.03 kN*m	M _{z,pl,Rd} = 63.69 kN*m	V _{y,T,Rd} = 771.51 kN
	M _{y,c,Rd} = 762.03 kN*m	M _{z,c,Rd} = 63.69 kN*m	V _{z,Ed} = -128.42 kN
	M _{N,y,Rd} = 759.83 kN*m	M _{N,z,Rd} = 63.50 kN*m	V _{z,T,Rd} = 951.62 kN
	M _{b,Rd} = 645.78 kN*m		T _{t,Ed} = -0.00 kN*m
			Class of section = 1



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

z = 1.00	M _{cr} = 3892.08 kN*m	Curva _{LT} - d	X _{LT} = 0.82
L _{cr,upp} = 1.46 m	Lam _{LT} = 0.44	fi _{LT} = 0.69	X _{LT,mod} = 0.85

BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:



About z axis:

VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$N_{Ed}/N_{t,Rd} = 0.05 < 1.00$ (6.2.3.(1))
$M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd} = 0.79 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
$M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.9.1.(2))
$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^2 + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^2 = 0.62 < 1.00$ (6.2.9.1.(6))
$V_{y,Ed}/V_{y,T,Rd} = 0.00 < 1.00$ (6.2.6-7)
$V_{z,Ed}/V_{z,T,Rd} = 0.13 < 1.00$ (6.2.6-7)
$\tau_{xy,Ed}/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00$ (6.2.6)
$\tau_{xz,Ed}/(f_y/(\sqrt{3})gM0) = 0.00 < 1.00$ (6.2.6)
Global stability check of member:
$M_{y,Ed}/M_{b,Rd} = 0.93 < 1.00$ (6.3.2.1.(1))

Section OK !!!

CODE: EN 1993-1:2005/A1:2014, Eurocode 3: Design of steel structures.

ANALYSIS TYPE: Member Verification

CODE GROUP:

MEMBER: 115 Travamentos pórtico_115

POINT: COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m

LOADS:

Governing Load Case: 127 ULS: PP + RCP + W90S + 0,5S + 0,6TI + X+ (1+2+11)*1.00+3*0.75+8*1.50+10*0.90

MATERIAL:

S 275 (S 275) $f_y = 275.00$ MPa



SECTION PARAMETERS: CHS 139.7x10

h=14.0 cm

gM0=1.00

gM1=1.00

Ay=25.91 cm²

Az=25.91 cm²

Ax=40.70 cm²

tw=1.0 cm

Iy=862.00 cm⁴

Iz=862.00 cm⁴

Ix=1724.00 cm⁴

Wply=168.55 cm³

Wplz=168.55 cm³

INTERNAL FORCES AND CAPACITIES:

$N_{Ed} = 248.75$ kN

$N_{c,Rd} = 1119.25$ kN

$N_{b,Rd} = 249.05$ kN

Class of section = 1



LATERAL BUCKLING PARAMETERS:

BUCKLING PARAMETERS:



About y axis:

$L_y = 7.42$ m

$\lambda_{m,y} = 1.86$

$L_{cr,y} = 7.42$ m

$\chi_y = 0.22$

$\lambda_{my} = 161.24$



About z axis:

$L_z = 7.42$ m

$\lambda_{m,z} = 1.86$

$L_{cr,z} = 7.42$ m

$\chi_z = 0.22$

$\lambda_{mz} = 161.24$

VERIFICATION FORMULAS:

Section strength check:

$N_{Ed}/N_{c,Rd} = 0.22 < 1.00$ (6.2.4.(1))

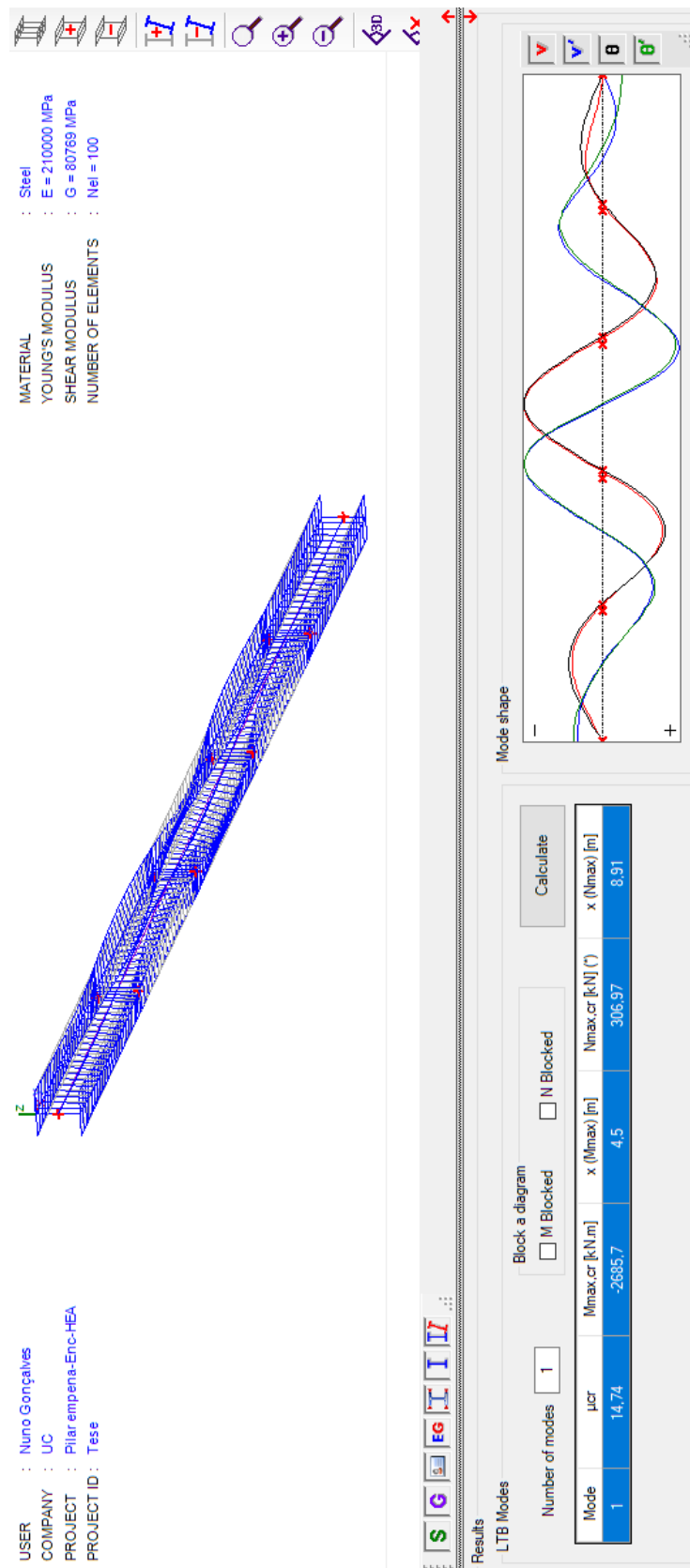
Global stability check of member:

$\lambda_{m,y} = 161.24 < \lambda_{m,max} = 210.00$

$\lambda_{m,z} = 161.24 < \lambda_{m,max} = 210.00$ STABLE

$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 1.00 < 1.00$ (6.3.1.1.(1))

Section OK !!!



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridade Nacional da proteção civil. (2009). *Despacho n.º 2074/2009* (Issue 2074/2009, pp. 2050–2059).
- Cadorin, J. F., & Franssen, J. M. (2003). A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 2: Methodology and application. *Fire Safety Journal*.
- CEE. (2011). *Regulamento n.º 305*. 50, 1–54.
- CEN. (1997). *EN 10219 - Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels*. 3(February).
- CEN. (2002). *Eurocode 1: Actions on structures -Part 1-1: General actions -Densities, self-weight, imposed loads for buildings*.
- CEN. (2004a). *EN 10025-2: Hot rolled products of structural steels - Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*.
- CEN. (2004b). *EN 10025-5: Hot rolled products of structural steels - Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance*.
- CEN. (2006). *EN 10219-1. Cold formed welded structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels. Part 1: Technical delivery conditions*.
- CEN. (2018). *EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures*.
- Corus Construction. (2004). Whether to use steel or concrete for the. *Comparing the Cost of Steel and Concrete Framing Options for Commercial Building*.
- Eberius, C., & Fjällström, K. (2017). *The impact of fire development on design resistance of structures*.
- Economics, T. (2021). *Steel data 2021*. <https://tradingeconomics.com/commodity/steel>
- Gabinete do Secretário de Estado das Infraestruturas. (2019). *Despacho Normativo 21/2019*. www.dre.pt
- IPQ. (2007). *NP EN 206-1: Betão Parte1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*.
- IPQ. (2009a). *Eurocódigo 3 - Acções em estruturas Parte 1-3 :Acções gerais Acções da neve*.
- IPQ. (2009b). *Norma Portuguesa - Eurocódigo 0 - Bases para o projeto de estruturas*.
- IPQ. (2009c). Parte 1-5: Acções gerais - Acções térmicas. *Eurocódigo 1 – Acções Em Estruturas*.
- IPQ. (2010a). Eurocódigo 1 : Acções em estruturas — Acções gerais — Part 1-4 : Acções do vento.
- IPQ. (2010b). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas Parte 1-2: Acções gerais Acções em estruturas expostas ao fogo*.
- IPQ. (2010c). *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão Parte 1-2: Regras gerais Verificação da resistência ao fogo*.
- IPQ. (2010d). *Eurocódigo 2 - Projecto estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- IPQ. (2010e). *Eurocódigo 3: Parte 1-10 - Tenacidade dos Materiais e Propriedades Segundo a Espessura*.

- IPQ. (2010f). Eurocódigo 3: Parte 1–2: Verificação da resistência ao fogo. In *En 1993-1-2*.
- IPQ. (2010g). *Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- IPQ. (2010h). Eurocódigo 8 - Projecto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. In *Instituto Português da Qualidade*.
- IPQ. (2011a). *Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- IPQ. (2011b). Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão. Parte 1-2: Regras gerais de verificação ao fogo.
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248.
- Lusa. (2019, May 13). *Setor da construção metálica fatura anualmente mais de quatro mil milhões de euros*. <https://www.dn.pt/lusa/setor-da-construcao-metalica-fatura-anualmente-mais-de-quatro-mil-milhoes-de-euros-10892238.html>
- Martins, M. P., & Pedro, J. O. P. (2020). *Dimensionamento de Estruturas de Edifícios e Estruturas Especiais* (Press (ed.); 1.^a, Vol. 2).
- Martins, P. M., & Pedro, J. J. O. (2020). *Dimensionamento de Estruturas de Edifícios e Estruturas Especiais* (Press (ed.); 1st ed., Vol. 1).
- Mesquita. (2008). *7.º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*.
- Ministério da Administração Interna. (2008). Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12 de Novembro. In *Diário da República n.º 220/2008, Série I de 2008-11-12* (pp. 7903–7922).
- Ministério da Administração Interna. (2020). Portaria 135/2020 de 2 de junho. In *Diário da República*.
- Ministério da habitação, obras públicas e transportes. (1983). *RSA - Regulamento de segurança e ações*.
- Pinheiro, S. (2012). *Edifícios sustentáveis em construção metálica*. 134. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/29695>
- Roma, R. (2012). *Análise da Sustentabilidade de Estruturas: Aço vs Betão*.
- SCI. (2021). *Steel Construction*. https://www.steelconstruction.info/The_Steel_Construction_Information_System
- Silva, B. M. S. da. (2016). *Integração do cálculo estrutural ao fogo em projeto através de uma ferramenta BIM*. e
- Silva, L. S., & Gervásio, H. (2020). *Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos avançados* (CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista (ed.); 2nd ed.).
- Simões, R. A. D. (2007). *Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas* (António Ressano Garcia Lamas (ed.); 2nd ed., Vol. 1).
- Vila Real, P. (2021). *Dimensionamento ao Fogo de estruturas metálicas* (CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista (ed.); 1.^a).
- WSA. (2019). Steel Statistical Yearbook 2019. In *Steel statistical yearbook 2019* (Vol. 1). <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>
- WSA. (2020). 2020 World Steel in Figures. In *WSA* (Issue 30 April). <http://www.worldsteel.org/wsif.php>
- WSA. (2021). *About steel*. <https://www.worldsteel.org/about-steel/about-steel.html>