



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

# **Caracterização do Comportamento de Lajes Mistas em Situação de Incêndio**

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

Autor

**Laura da Silva Seco**

Orientador

**Aldina Maria Cruz Santiago  
Rui António Duarte Simões**

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

**Coimbra, Julho, 2016**

## AGRADECIMENTOS

Este espaço dedica-se aqueles que, pelo seu apoio e incentivo, merecem o meu reconhecimento.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Aldina Maria Cruz Santiago e Professor Doutor Rui António Cruz Simões, pela orientação e colaboração, pelo apoio constante, pela disponibilidade, pelas opiniões e críticas, pelo rigor e incansável dedicação a este trabalho, os meus sinceros e profundos agradecimentos.

A todos os docentes com quem me cruzei durante o meu percurso escolar e que partilharam comigo saberes valiosos, em especial ao Professor Doutor Luís Filipe da Costa Neves, ao Professor Doutor Jorge Nuno Veiga de Almeida e Sousa e ao Professor Doutor António Maranha Pereira da Gama.

Aos meus pais, por serem o meu exemplo de força, coragem e superação na vida, por acreditarem em mim, e por me terem apoiado incondicionalmente ao longo destes 5 anos.

Aos meus companheiros de curso, Inês Cunha, Carla Flor, Sara Gouveia, Ângela Lemos, Rita Rêgo, Diogo Ferreira, Guilherme Prata Ribeiro, David Valério e aos Endivigados, pelo companheirismo, motivação e ajuda. Um agradecimento especial à Catarina Mouraz, pela enorme amizade que criámos, pela partilha de bons momentos e estímulo nas alturas de desânimo.

Aos meus amigos de sempre, Rita Figueiredo, Mafalda Oliveira, Diana Gomes, Inês Canha, Sofia Tomé, Bernardo Lemos, João Teles, Raul Garcia e Bernardo Pereira, por compreenderem as constantes ausências e nunca desistirem da nossa amizade.

Ao Martim Matos, pelo apoio e carinho diário, e pela transmissão de força e confiança.

E por último, à minha irmã, a quem dedico esta dissertação. Não existem palavras que expressem a minha gratidão e que descrevam todo o amor, dedicação, incentivo e companheirismo. Sem ela, nada seria possível.

## RESUMO

O sistema de lajes mistas, que consiste na combinação das propriedades de uma chapa colaborante metálica com o betão, tem vindo a conquistar em todo o mundo um lugar preponderante face às alternativas existentes no mercado para as lajes de betão armado. A crescente adopção desta solução por parte dos projectistas deve-se ao conjunto de vantagens que apresentam, tais como: rapidez de montagem e execução, minimização da espessura das lajes e consequente diminuição do peso próprio das estruturas, dispensa de cofragem e escoramentos e, benefícios ambientais pois trata-se de um material totalmente reciclável (aço).

O efeito que a acção do fogo exerce sobre as estruturas é alvo de grande atenção e estudo por parte dos investigadores. O comportamento dos vários elementos estruturais, tais como lajes, vigas e pilares, e a redução da capacidade residual da sua resistência após atingir elevadas temperaturas podem trazer consequências gravosas. Assim, para garantir a estanquidade e isolamento das construções bem como evitar o seu colapso, a regulamentação vigente para projecto e dimensionamento de segurança estrutural ao fogo de estruturas mistas – EN 1994-1-2 (Eurocódigo 4, Parte 1-2) – fornece requisitos e exigências no desempenho das estruturas mistas. A metodologia aconselhada apresenta um conjunto de regras simples baseadas na resistência ao fogo dos vários elementos que constituem o edifício, válidas para situações de curva de incêndio padrão.

O trabalho que se pretende desenvolver ao longo desta dissertação abrange o estudo do comportamento e verificação da resistência ao fogo de lajes mistas com dois tipos de perfil distintos de chapa colaborante, um existente no mercado de 60 mm de altura e outro com 120 mm, a ser desenvolvido em paralelo com esta investigação. Adicionalmente, será avaliado o aumento de resistência ao fogo para estes dois casos com recurso à introdução de varões longitudinais nas nervuras.

Deste modo, a presente dissertação inclui uma pesquisa bibliográfica inicial para permitir uma melhor compreensão do comportamento das lajes mistas expostas a temperaturas elevadas. De seguida, far-se-á um estudo e verificação do comportamento ao fogo das diferentes configurações, com recurso às metodologias referidas na regulamentação, com o objectivo final de obter sob a forma de tabelas de cálculo directo o tempo de resistência ao fogo, consoante o nível de carga actuante.

## **ABSTRACT**

The composite slabs system, consisting of the combination of the properties of a profiled steel sheeting cooperating with concrete, has been gaining worldwide a leading place compared to existing alternatives on the market for slabs of reinforced concrete. The growing adoption of the solution by the designers due to the set of advantages are such as: quick installation, reduced thicknesses of the slabs and the consequent decrease in the self-weight of the structures, no formwork and environmental benefits because it is a fully recyclable material (steel).

The effect that the fire action has on the structures need a lot of attention and study by researchers. The behaviour of the various structural elements such as slabs, beams and columns, and the reduction of the residual capacity of its strength after reaching elevated temperatures may bring serious consequences. Thus, to ensure the tightness and insulation of buildings and prevent its collapse, the current regulations for design of structural fire safety of composite structures - EN 1994-1-2 (Eurocode 4, Part 1-2) - provides requirements and demands on the performance of composite structures. The recommended methodology presents a set of simple rules based on the fire resistance of the various elements of the building, valid for standard fire exposure.

The work to be developed along this dissertation includes the study of the behaviour and check the fire resistance of composite slabs with two different types of profiled steel sheeting, an existing one with a height of 60 mm and another with 120 mm, to be developed in parallel with this investigation. Additionally, it will be evaluated the increase in fire resistance for these two cases by means of the introduction of longitudinal rebars on the ribs.

Thus, this dissertation includes an initial literature review to allow a better understanding of the behaviour of composite slabs exposed to elevated temperatures. Then, a study and verification of the behaviour under fire conditions of different configurations will be done, using the methodologies covered by the regulation, with the ultimate goal to achieve in the form of direct calculation tables the fire resistance time, according to the level of acting load.

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Dimensionamento estrutural ao fogo.....	2
1.3 Objectivos.....	2
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
2 O ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 Introdução histórica.....	5
2.2 Estudos e ensaios experimentais.....	5
2.2.1 Testes CIRIA.....	6
2.2.2 Testes FRS-BSC.....	7
2.2.3 Ensaio de <i>Cardington</i> .....	7
2.2.4 Estudos numéricos e analíticos.....	10
2.3 Legislação existente.....	12
2.3.1 Introdução.....	12
2.3.2 Exigências regulamentares.....	14
2.4 Materiais e sistemas de melhoramento da resistência ao fogo.....	16
2.4.1 Introdução.....	16
2.4.2 Medidas activas.....	17
2.4.3 Medidas passivas.....	17
2.4.3.1 Sistemas de protecção com aumento da resistência à temperatura ambiente e em situação de incêndio.....	17
2.4.3.2 Sistemas de protecção com aumento da resistência em situação de incêndio.....	18
3 AVALIAÇÃO REGULAMENTAR.....	20
3.1 Conceitos gerais.....	20
3.2 Cálculo de acções e combinações de dimensionamento.....	21
3.2.1 Introdução.....	21
3.2.2 Acções mecânicas.....	21
3.2.3 Acções térmicas.....	22
3.2.4 Combinações de acções e cálculo dos esforços.....	23
3.3 Cálculo das temperaturas nos elementos.....	24
3.3.1 Introdução.....	24
3.3.2 Evolução das temperaturas com o tempo para o cálculo do momento resistente positivo.....	24
3.3.3 Evolução das temperaturas com o tempo para o cálculo do momento resistente negativo.....	29

---

3.4 Propriedades dos materiais a elevadas temperaturas .....	31
3.4.1 Introdução .....	31
3.4.2 Aço .....	31
3.4.3 Betão .....	35
3.5 Análise do comportamento estrutural e verificações .....	37
3.5.1 Introdução .....	37
3.5.2 Verificação ao estado limite último de flexão .....	38
3.5.2.1 Cálculo do momento flector resistente positivo $M_{fi,Rd}^+$ .....	38
3.5.2.2 Cálculo do momento flector resistente negativo $M_{fi,Rd}^-$ .....	40
3.5.3 Verificação ao estado limite último de corte vertical .....	41
3.5.4 Verificação ao estado limite último de corte longitudinal .....	43
3.5.4.1 Introdução .....	43
3.5.4.2 Cálculo da resistência ao corte longitudinal em lajes sem ancoragem de extremidade .....	43
3.5.4.3 Cálculo da resistência ao corte longitudinal em lajes com ancoragem de extremidade .....	46
4 APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE TABELAS DE CÁLCULO .....	47
4.1 Introdução .....	47
4.2 Caso de estudo 1: exemplo de cálculo de lajes mistas de 1 tramo .....	47
4.3 Caso de estudo 2: exemplo de cálculo de lajes mistas de 2 tramos .....	59
4.4 Desenvolvimento de tabelas .....	63
4.5 Conclusões .....	67
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	68
5.1 Conclusões .....	68
5.2 Desenvolvimentos futuros .....	68
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70

## SIMBOLOGIA

### Letras minúsculas latinas

$a$	Distância entre o eixo do perno e a extremidade da chapa, não inferior a $1.5d_{do}$
$b_0, b_1, b_2, b_3$ e $b_4$	Factores auxiliares para o cálculo de $\Theta_a$
$b$	Largura da secção transversal
$b_w$	Menor largura da secção transversal à tracção
$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4$ e $c_5$	Factores auxiliares para o cálculo de $\Theta_s$
$c_a$	Calor específico do aço
$c_c$	Calor específico do betão
$d_0, d_1, d_2, d_3$ e $d_4$	Factores auxiliares para o cálculo de $\Theta_{lim}$
$d$	Altura útil da secção
$d_{do}$	Diâmetro do anel de soldadura que pode ser considerado como 1,1 vezes o diâmetro da espiga do perno
$d_s$	Distância do topo da laje ao centro geométrico dos varões longitudinais
$e$	Posição do eixo neutro elástico
$e_p$	Posição do eixo neutro plástico
$f_{ap,\theta}$	Limite proporcional do aço estrutural e de varões em situação de incêndio
$f_{ay,\theta}$	Tensão máxima do aço em situação de incêndio
$f_{bv}$	Tensão básica de cedência da chapa
$f_{cd}$	Valor de cálculo da tensão de cedência no betão
$f_{ck}$	Valor característico da tensão de cedência no betão
$f_{c,\theta}$	Tensão de cedência do betão a elevadas temperaturas
$f_u$	Tensão de rotura do aço
$f_{y,i}$ e $f_{c,j}$	Tensão nominal de cedência no aço e no betão, respectivamente
$f_{yp,d}$	Valor de cálculo da tensão de cedência da chapa
$h_1$	Altura da lâmina de betão acima da chapa
$h_2$	Altura da chapa
$h_{eff}$	Altura efectiva da laje mista
$h_w$	Altura da alma da chapa
$k_{y,\theta,i}$ e $k_{c,\theta,j}$	Coefficientes de redução das propriedades mecânicas do aço e do betão
$l_1$	Largura total do banzo inferior da chapa e almas
$l_2$	Largura do banzo inferior da chapa
$l_3$	Largura do banzo superior da chapa
$m, k$	Parâmetros característicos da chapa metálica ao corte longitudinal

---

$q_{Ed}$	Valor de cálculo da carga uniforme actuante
$q_{fi,Ed}$	Valor de cálculo da carga uniforme actuante em situação de incêndio
$t$	Tempo de incêndio; Espessura da chapa
$t_{fi,d}$	Valor de cálculo da resistência ao fogo standard de um elemento em situação de incêndio
$t_{fi,requ}$	Resistência ao fogo standard requerida em situação de incêndio
$u_1$ e $u_2$	Distância mais curta entre o centro do varão e qualquer ponto da alma da chapa
$u_3$	Distância do varão longitudinal ao banzo inferior da chapa
$x$	Profundidade do eixo neutro
$x_{pl}$	Altura da lâmina de betão à compressão
$y_g$	Centro geométrico da chapa
$y_{g,ef}$	Centro geométrico efectivo da chapa
$z_1$	Distância do ponto de aplicação da força $N_c$ ao centro geométrico dos varões longitudinais
$z$	Factor indicativo da posição do varão longitudinal na nervura
$z_i$ e $z_j$	Distância ao eixo neutro plástico do centro geométrico das áreas elementares $A_i$ e $A_j$

### Letras maiúsculas latinas

$A_c$	Área da secção transversal de betão
$A_d$	Acção accidental
$A_i$ e $A_j$	Áreas elementares de aço e de betão, respectivamente
$A_p$	Área da chapa
$A_{nominal}$	Área nominal da chapa
$A_{pe}$	Área da chapa considerando $t = t_{real} - e_{galvanização}$
$A_{sl}$ e $A_s$	Área do reforço à tracção (varões longitudinais)
$A/L_r$	Factor geométrico da nervura
$C_{Rd,c}$	Coefficiente dado por $0.18/\gamma_c$
$E_{a,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço a elevadas temperaturas
$E_d$	Valor de cálculo do efeito das acções
$E_{fi,d,t}$	Valor de cálculo do efeito das acções em situação de incêndio
$G_k$	Valor característico das acções permanentes
$I_{ef}$	Momento de inércia efectivo da chapa
$I_p$	Momento de inércia da chapa
$L_s$	Vão de corte
$L_x$	Distância entre secção transversal considerada e o apoio mais próximo



---

$M_{fi,Ed}$	Valor de cálculo do momento flector máximo actuante em situação de incêndio
$M_{fi,Rd}$	Valor de cálculo do momento flector resistente em conexão total em situação de incêndio
$M_{fi,Rd}^+$	Valor de cálculo do momento flector resistente positivo em conexão total em situação de incêndio
$M_{fi,Rd}^-$	Valor de cálculo do momento flector resistente negativo em conexão total em situação de incêndio
$M_{pa}$	Momento flector resistente plástico da chapa
$N_{as}$ e $N_s$	Força de tracção nos varões longitudinais para momento negativo
$N_{Ed}$	Força axial na secção transversal causada pela carga ou aplicação de pré-esforço
$N_c$	Força de compressão na laje de betão
$N_{cf}$	Valor mínimo entre a resistência à compressão da laje de betão com espessura $h_c$ e a resistência à tracção da chapa
$P$	Acção do peso próprio
$P_{pb,Rd}$	Valor de cálculo da resistência de um conector
$Q_k$	Valor característico das acções variáveis
$R_{fi,d,t}$	Valor de cálculo da resistência às acções em situação de incêndio
$V_{Ed}$	Valor de cálculo do esforço transversal máximo actuante
$V_{fi,Ed,max}$	Valor de cálculo do esforço transversal máximo actuante em situação de incêndio
$V_{fi,Rd,max}$	Valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal em situação de incêndio
$V_{Rd,c}$	Valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal
$W_{el,ef}$	Módulo elástico efectivo de flexão
$X_I$	Abcissa do ponto I
$X_{II}$	Abcissa do ponto II
$X_{III}$	Abcissa do ponto III
$X_{IV}$	Abcissa do ponto IV
$Y_I$	Ordenada do ponto I
$Y_{II}$	Ordenada do ponto II
$Y_{III}$	Ordenada do ponto III
$Y_{IV}$	Ordenada do ponto IV

### Letras minúsculas gregas

$\alpha$	Ângulo da alma da chapa
$\alpha_{slab}$	Coefficiente da laje que têm em conta o diagrama rectangular de tensões
$\gamma_c$	Coefficiente parcial de segurança do betão

---

$\gamma_G$	Coeficiente de majoração das acções permanentes
$\gamma_Q$	Coeficiente de majoração das acções variáveis
$\gamma_{M0}$	Coeficiente parcial de segurança do aço estrutural
$\gamma_{vs}$	Coeficiente parcial de segurança para a resistência ao corte de lajes mistas
$\delta$	Alongamento após rotura do aço
$\epsilon_{cu}$	Extensão última do betão
$\epsilon_{cu,\theta}$	Extensão última do betão a elevadas temperaturas
$\phi$	Ângulo de inclinação da alma da chapa com a horizontal; Diâmetro dos varões longitudinais
$\eta_{fi}$	Factor de redução aplicado aos esforços $E_d$ para obter $E_{fi,d}$
$\lambda_a$	Conductividade térmica do aço
$\lambda_c$	Conductividade térmica do betão
$\rho_l$	Rácio entre $A_{sl}$ e $b_w.d$
$\sigma_{cp}$	Valor da tensão limite no betão
$\tau_{u,Rd}$	Valor de cálculo da tensão última resistente ao corte
$\psi_{0,i}$	Coeficiente para determinação do valor de combinação de uma acção variável i
$\psi_{1,i}$	Coeficiente para determinação do valor frequente de uma acção variável i
$\psi_{2,i}$	Coeficiente para determinação do valor quase-permanente de uma acção variável i

### Letras maiúsculas gregas

$\Delta/l$	Variação de comprimento
$\Theta_a$	Temperatura na chapa
$\Theta_g$	Temperatura no ar, obtida pela curva ISO 834
$\Theta_{lim}$	Temperatura limite do betão
$\Theta_s$	Temperatura nos varões longitudinais
$\Phi$	Factor de configuração

## ABREVIATURAS

AISC	American Institute of Steel Construction
BSC	British Steel Corporation
CIRIA	Construction Industry Research & Information Association
ECCS	European Community for Coal and Steel; European Convention for Constructional Steelwork
FRS	Fire Research Station
RJ-SCIE	Regulamento Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A crescente adopção de estruturas metálicas e mistas por parte dos projectistas deve-se às numerosas vantagens e características únicas que compõem uma estrutura deste tipo. A construção mista aço-betão representa uma solução estrutural versátil e económica aplicável tanto em edifícios como em pontes. A combinação das propriedades dos materiais aço e betão deu origem a uma revolução nas técnicas de construção, diminuindo drasticamente o tempo de execução e montagem, aumentando o nível de qualidade, com a possibilidade de produzir a estrutura fora do local de instalação, reduzindo a espessura das lajes e consequentemente a altura dos edifícios e o peso-próprio que por sua vez se traduzirá numa redução de custo significativa.

O estudo que será aqui efectuado recai sobre um elemento estrutural de grande importância em edifícios: a laje. Este componente detém grande influência no custo e duração globais de execução de uma obra. Desta forma, a solução de lajes mistas é caracterizada pela junção de uma chapa de aço perfilada que suporta, em fase de construção, uma determinada espessura de betão com ou sem varões de aço. Esta exerce diversas funções consoante a fase da obra que se considera: i) actua como cofragem, suportando total ou parcialmente as cargas actuantes durante a fase de construção e ii) aumenta a resistência à tracção nas fibras inferiores durante o tempo de vida útil da obra, podendo mesmo ser considerada como a armadura de tracção necessária nas zonas de momentos positivos. Existem várias configurações para este tipo de laje, mas apenas a solução nervurada unidirecional com cofragem metálica perdida simplesmente apoiada será analisada com maior detalhe. O estudo levado a cabo, pretende avaliar e caracterizar o comportamento destes elementos ao fogo, pois considera-se que a resistência expectável nestas situações está aquém da realidade. O modo de rotura mais frequente e que caracteriza o comportamento das lajes mistas descritas anteriormente em condições normais e de incêndio é a flexão. Embora não havendo referências sobre a consideração dos modos de rotura de corte longitudinal e transversal a elevadas temperaturas, estes serão tidos em conta nas verificações. Este estudo insere-se num projecto de investigação de âmbito mais alargado em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra que pretende otimizar o desempenho destes elementos à temperatura ambiente e em caso de incêndio, obtendo soluções mais vantajosas do ponto de vista financeiro e ambiental.

## 1.2 Dimensionamento estrutural ao fogo

A segurança contra incêndios em estruturas têm vindo a ganhar especial importância por parte dos legisladores. As lajes estão inseridas no conjunto de elementos de compartimentação que devem garantir estanquidade e isolamento da estrutura bem como a segurança estrutural em caso de incêndio. A regulamentação existente EN 1994-1-2 (CEN 2005) para projecto de estruturas mistas ao fogo fornece algumas exigências e directivas a considerar no comportamento e desempenho destes elementos de modo a que seja possível limitar a extensão do fogo, assegurar a evacuação das pessoas e evitar o colapso total da estrutura mantendo a sua integridade ao longo das fases de aquecimento e arrefecimento do incêndio.

Quando sujeito a elevadas temperaturas, devido à sua elevada conductividade térmica, o aço revela-se como sendo um material com fraco desempenho. Na maioria dos casos, as chapas colaborantes que integram as lajes mistas não são protegidas termicamente pelo que o aumento de temperatura alastra-se muito rapidamente. Esta subida das temperaturas irá, por sua vez, contribuir para uma redução drástica da resistência mecânica destes elementos. Por outro lado, o betão caracteriza-se como um material de baixa conductividade térmica com grande capacidade de absorção de calor, atrasando a subida da temperatura dos elementos de aço. Assim, torna-se fundamental analisar e prever o comportamento das estruturas mistas quando expostas à acção do fogo para minimizar os riscos dos seus utilizadores e da envolvente e ainda, investigar soluções inovadoras e económicas para melhorar o tempo de resistência ao fogo.

## 1.3 Objectivos

A presente dissertação insere-se no projecto *INOV-LAMI* em curso no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Este tem como objectivo estudar e desenvolver novos perfis de chapa colaborante para lajes mistas bem como possíveis sistemas de reforço para melhorar as suas propriedades resistentes, à temperatura ambiente e em situação de incêndio. Por outro lado, o trabalho a desenvolver nesta dissertação pretende dar apoio aos projectistas que, para dimensionamento de lajes mistas ao fogo, dispõem de pouca informação por parte dos catálogos de fabricantes. Estes apenas fazem referência à resistência mínima, R30, fornecida pelos seus produtos. Se num dado projecto é exigida ao projectista uma resistência ao fogo superior, estes terão a necessidade de proceder a um cálculo específico. Desta forma, pretendendo aliar uma economia de tempo a uma redução de custos e gasto de materiais, desenvolveram-se tabelas de cálculo directo da resistência ao fogo de lajes mistas.

O projecto de investigação incide sobre a caracterização e optimização do sistema estrutural laje mista usando dois perfis de chapa metálica com diferentes alturas (60 mm e 120 mm), de modo a desenvolver alternativas resistentes, económicas e sustentáveis a inserir no mercado. O perfil da chapa com 60 mm foi desenvolvido no passado no Departamento de Engenharia Civil enquanto que, o perfil com altura 120 mm encontra-se actualmente em desenvolvimento na mesma instituição.

No âmbito desta dissertação, será feita uma análise pormenorizada aos regulamentos existentes para o dimensionamento de lajes mistas expostas ao fogo (capítulo 3 – Avaliação Regulamentar). Adicionalmente, no estudo das duas configurações de lajes mistas em causa (com 60 mm e 120 mm de altura) será tido em conta a melhoria das capacidades de resistência pela introdução de reforços entre as nervuras, materializados por varões longitudinais com diferentes diâmetros.

Por último, dependendo do nível de carga actuante e dos reforços longitudinais aplicados, pretende-se a elaboração de tabelas de cálculo directo de lajes mistas com os dois tipos de chapa perfilada representados na figura 1.1 e acima mencionados, para obtenção do tempo de resistência ao fogo. Conforme referido anteriormente, a chapa com 120 mm ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Por conseguinte, por razões de confidencialidade, a sua geometria detalhada não será apresentada neste documento.

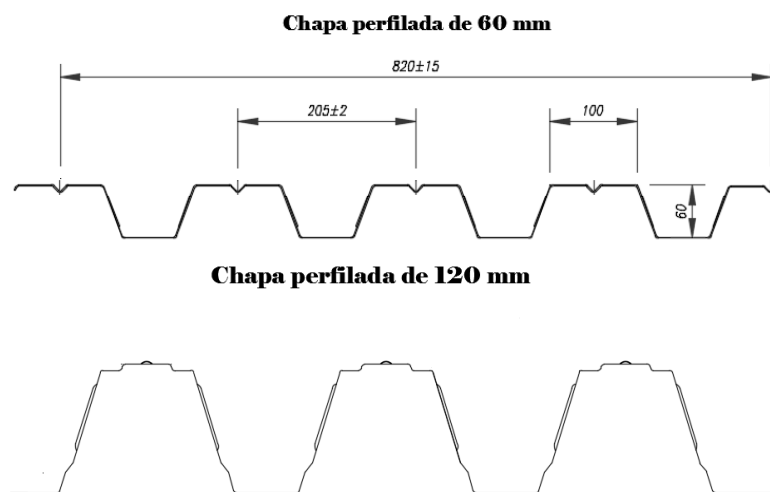


Figura 1.1 – Perfis metálicos estudados H60 e H120.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação inclui sete capítulos e Anexos finais. De seguida, faz-se uma breve descrição de cada um:

No **Capítulo 1 – Introdução** é feito o enquadramento do projecto de investigação, realçando a importância das estruturas metálicas nos dias de hoje e a necessidade de garantir a sua integridade em caso de incêndio. Descreve-se também o âmbito e objectivos delineados para esta dissertação.

O **Capítulo 2 – O Estado da Arte** é dedicado à descrição dos desenvolvimentos e investigações anteriormente efectuadas por outros autores sobre cálculo estrutural e optimização ao fogo de lajes mistas.

No **Capítulo 3 – Avaliação Regulamentar** apresenta-se uma análise resumida do procedimento de cálculo de lajes mistas expostas a elevadas temperaturas de acordo com a norma EN 1994-1-2 (CEN 2005). Faz-se referência às acções a considerar (EN 1991-1-2) e outros fundamentos teóricos que não estão contemplados nos regulamentos.

O **Capítulo 4 – Desenvolvimento de Tabelas de Cálculo** destina-se à elaboração de tabelas de cálculo directo de lajes mistas com ou sem reforço longitudinal expostas ao fogo, de modo a obter os tempos de resistência consoante a carga actuante. Estas tabelas contêm informação relevante de apoio aos projectistas de estruturas metálicas que pretendam fazer dimensionamento estrutural de segurança ao fogo.

No **Capítulo 5 – Conclusões** são retiradas ilações após a análise e comparação dos resultados obtidos. Faz-se ainda uma breve referência a propostas de trabalhos futuros que dêem continuação a este estudo.

O **Capítulo 6 - Referências Bibliográficas** resume todos os artigos, livros e textos de apoio consultados para a elaboração desta dissertação.

## 2 O ESTADO DA ARTE

### 2.1 Introdução histórica

O conceito de estrutura mista remonta a meados do século XIX, onde a técnica de construção mais usual consistia em combinar o ferro e a madeira em sistemas treliçados incluídos em pontes (Calado e Santos, 2009).

Segundo há registo, os primeiros estudos sobre sistemas de lajes mistas aço-betão surgiram no início da década de 50 na América do Norte. Em 1952, com a crescente adopção das estruturas mistas por parte dos projectistas, foi publicada uma regulamentação de construções mistas pelo *American Institute of Steel Construction – AISC* (Calado e Santos, 2009). Só mais tarde, na Europa Ocidental, começaram a notar-se desenvolvimentos nesta área impulsionados pelo Professor J. Fisher no Politécnico Federal de Lausanne (Narayanan, 1988).

A preocupação em proteger os elementos estruturais mistos expostos ao fogo aparece igualmente no século XIX, onde as componentes de ferro eram embebidas propositadamente em betão, melhorando o seu comportamento quando sujeito a elevadas temperaturas. A partir dos anos 80, o uso de lajes mistas em edifícios aumentou rapidamente na Europa, o que levou os membros do *European Community for Coal and Steel – ECCS* - a criar as primeiras recomendações para cálculo da resistência de lajes mistas ao fogo em 1983. No entanto, a falta de dados relativamente à resistência ao fogo de lajes mistas continuava presente e a incomodar as autoridades reguladoras do Reino Unido e Europa (Cooke et al., 1988). Seguiram-se então uma série de pesquisas e testes em larga escala cujos resultados serviram de base aos Eurocódigos e às Normas Inglesas que hoje conhecemos.

Em Portugal, a consciencialização da necessidade de regulamentação deu-se em 1988 após o trágico incêndio dos Armazéns do Chiado na Baixa de Lisboa (Vila Real, 2003). Hoje em dia, com os desenvolvimentos nesta área, os projectistas tem como base a EN 1993 e respectivo Anexo Nacional (CEN 2005), onde se encontram algumas especificidades somente válidas no nosso país.

### 2.2 Estudos e ensaios experimentais

Os ensaios que foram sendo realizados e as observações de incêndios reais em estruturas constituem os fundamentos do dimensionamento ao fogo de lajes mistas, permitindo o desenvolvimento de modelos de cálculo usados na actualidade. De seguida, apresentam-se



três dos principais projectos de investigação feitos, por ordem cronológica, e a sua respectiva contribuição para o conhecimento técnico nesta vertente da Engenharia de Estruturas.

### 2.2.1 Testes CIRIA

Os testes desenvolvidos no âmbito deste programa em lajes mistas foram realizados entre 1983 e 1985. No entanto, há registo de ensaios em lajes mistas contínuas anteriores a 1982. Estes testes experimentais, financiados pelos principais fabricantes de chapas metálicas do Reino Unido, tinham como propósito dois objectivos bem definidos, listados de seguida:

- provar que as lajes mistas contínuas com reforço ensaiadas conseguiriam atingir uma resistência ao fogo de 90 minutos, com vãos a alcançar dimensões de 3.6 metros sujeitos a cargas até  $6.7 \text{ kN/m}^2$ , típicas de edifícios comerciais;
- verificar que as lajes deformadas, quando próximas de atingir o ponto de rotura não têm qualquer interferência negativa no comportamento da estrutura de suporte, podendo desta forma considerar em separado o desempenho ao fogo destes dois elementos (estrutura de suporte e laje mista) (Cooke et al., 1988).

Os ensaios efectuados consistiram num teste à escala real, complementado por cinco de dimensão mais reduzida, com o intuito de avaliar a interacção entre os elementos de suporte e as lajes. Para a obtenção de resultados fiáveis, todos os provetes apresentavam um perfil de chapa metálica trapezoidal, com o mesmo valor de carga actuante de  $6.7 \text{ kN/m}^2$ . A principal diferença residia na malha de reforço colocada em cada modelo de pavimento (ver quadro 2.1). A preparação dos provetes demorou cerca de 6 meses, armazenando-os em condições secas de modo a atingir um teor de humidade nas lajes mistas de 3.5 a 4.5% (Cooke et al., 1988).

Quadro 2.1 – Resumo ensaios CIRIA (Cooke et al., 1988).

Profile	Concrete type	Slab depth (mm)	Span (m)	Imposed load ( $\text{kN/m}^2$ )	Reinforcement	Surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )		Test period (min)	Test ref.
						After 1h	After 1 1/2h		
Robertson QL59	LWC	130	3.0	6.7	A142 mesh	73	-	60	CIRIA 1
Robertson QL59	LWC	130	3.0	6.7	A142 mesh	70	100	105	CIRIA 2
Robertson QL59	LWC	130	3.0	6.7	A142 mesh	95	110	90	CIRIA 3
Holorib (UK)	LWC	120	3.0	6.7	A142 mesh	60	100	90	CIRIA 4
Robertson QL59	NWC	140	3.6	6.7	A193 mesh	66	98	90	CIRIA 5
Meteeno A55	NWC	140	3.6	6.7	A193 mesh	65	95	90	CIRIA 6

Todos os testes, sem exceção, apresentaram uma resistência mínima de 90 minutos ao fogo, objectivo pretendido no início deste programa de investigação.

### **2.2.2 Testes FRS-BSC**

Igualmente na década de 80, mais precisamente entre 1984 e 1986, foram levados a cabo *pelo British Steel Corporation* – BSC – uma série de ensaios com o objectivo de:

- analisar, através de testes em larga-escala, a fiabilidade do método anteriormente desenvolvido para a previsão do comportamento de lajes mistas ao fogo;
- examinar o efeito que as forças de catenária desenvolvidas exercem sobre a resistência das lajes mistas;
- aperfeiçoamento de técnicas de reforço eficazes com o intuito de aumentar a resistência destes elementos quando expostos a elevadas temperaturas.

À semelhança dos testes CIRIA, estes ensaios foram desenvolvidos em modelos de lajes mistas contínuas de 7.0 metros de comprimento, apoiadas em vigas espaçadas entre si de 3.0 metros, dimensionadas para uma resistência ao fogo de 90 minutos. Além da chapa metálica trapezoidal, as lajes estavam providas de barras de aço longitudinais de reforço com 5 mm de diâmetro, formando uma malha colocada à superfície da laje na zona dos apoios e junto à chapa a meio vão. Esta configuração permitiu uma melhor distribuição de esforços. Na fase de montagem dos provetes, com o peso do betão fresco, foram observados deslocamentos na chapa superiores aos expectáveis em cerca de 10%. Este desvio teve influência nos resultados obtidos.

Os três testes efectuados comprovaram uma resistência ao fogo de 90 minutos, sendo que atingiram o limite máximo admissível de deflexão aos 120 minutos. Este limite estipulado na BS 476 (1987) é dado pelo quociente do comprimento do vão sobre 20 (Cooke et al., 1988). Em todos os ensaios sem excepções, a relação entre a carga actuante e os deslocamentos foi aproximadamente linear até a atingir um estado de rotura iminente.

### **2.2.3 Ensaio de *Cardington***

Os ensaios realizados pelo *Cardington Laboratory of The Building Research Establishment* no Reino Unido em 1994 (Vila Real et al., 2012), representaram o pico da investigação científica na caracterização do comportamento de estruturas metálicas ao fogo. Os testes foram executados num modelo à escala real de um edifício de 8 pisos (ver figura 2.1). Os resultados deste ensaio foram e continuam a ser uma peça-chave fundamental para a regulamentação existente, subentendendo-se os Eurocódigos e as Normas Inglesas.



Figura 2.1 – Modelo de ensaios de *Cardington* (Vila Real et al., 2012).

As dimensões do modelo em planta eram de 21 m × 45 m com uma altura total de 33 m. A laje mista com 130 mm de espessura descarregava em vigas de suporte simplesmente apoiadas. A carga actuante foi materializada por sacos de areia, distribuídos uniformemente pelos pisos com o objectivo de simular uma carga característica de um edifício de escritórios. Ao todo foram realizados 6 testes (ver figura 2.2), com as mesmas condições de temperatura e protecção.

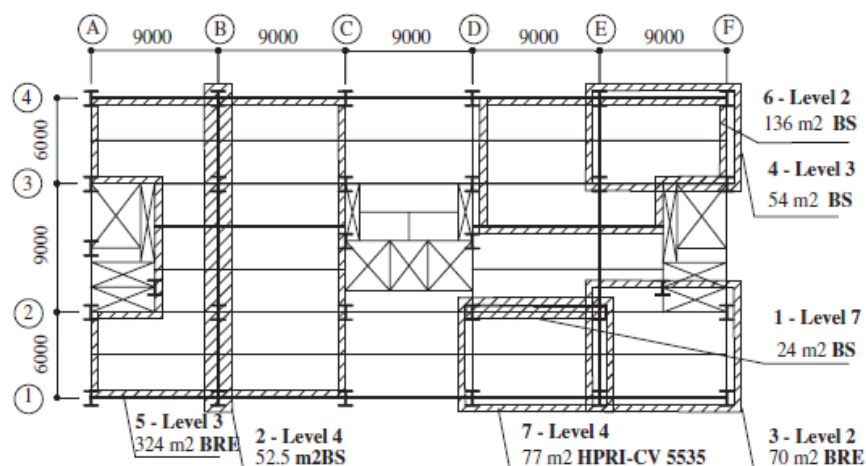


Figura 2.2 – Localização dos ensaios de *Cardington* (Wald et al., 2006).

Os testes 1 e 2 focaram-se na avaliação do comportamento de elementos individuais como vigas, lajes de pavimento e pilares. Por outro lado, os resultados obtidos dos ensaios 3, 4 e 5 permitiram compreender a evolução de um incêndio natural em compartimentos com diferentes configurações onde as vigas e as lajes foram deixadas sem protecção, ficando somente os pilares protegidos. O ensaio 6, que será descrito adiante com maior detalhe, tinha como propósito analisar a evolução da temperatura e o comportamento em conjunto de todos os elementos estruturais presentes num compartimento de escritórios com área em planta de 135 m<sup>2</sup>.

O ensaio 6 consistiu na construção de um cenário, dimensionado para uma resistência de 90 minutos, que representasse uma carga total de incêndio de 46 kg/m<sup>2</sup>, dotado de uma área total de janelas igual a 25.6 m<sup>2</sup>, mínimo permitindo pela regulamentação vigente. Para simular as condições normais de ventilação, 11.3 m<sup>2</sup> da área das janelas foi propositadamente deixada sem vidro. De todos os elementos estruturais presentes apenas nos pilares e nas ligações viga-pilar foram aplicadas medidas de protecção contra incêndio (Vila Real et al., 2012).

A principal razão para a realização deste programa de testes foi a recolha e análise de dados acerca do comportamento de uma estrutura mista real sujeita a elevadas temperaturas, para verificar e calibrar programas de cálculo estrutural desenvolvidos na época.

Os resultados obtidos foram bastante reveladores, indicando que as estruturas metálicas e mistas apresentam uma resistência ao fogo bastante superior relativamente ao que se pensava até à data. Ao longo do ensaio 6, a integridade global da estrutura foi preservada, demonstrando o bom desempenho da mesma sob condições extremas. A temperatura máxima global atingida chegou aos 1213°C, com uma temperatura média registada de 900°C. Nos elementos de aço não protegidos, o pico de temperatura chegou aos 1150°C. O deslocamento vertical máximo medido foi de 640 mm, com uma recuperação de 100 mm na fase posterior de arrefecimento. Apesar de toda a carga de incêndio ter sido consumida, não foram detectados quaisquer sinais de rotura iminente na estrutura. As únicas fissuras que a laje sofreu durante a fase de arrefecimento, localizadas nas extremidades superiores dos pilares, foram devidas à má colocação e sobreposição da malha de armaduras de reforço. Assim, é de extrema importância a consideração de comprimentos de sobreposição de armaduras entre painéis de laje (Vila Real et al., 2012).

Em 2003, com o objectivo de complementar o conhecimento existente sobre estruturas sujeitas a elevadas temperaturas, foi realizado um último ensaio neste edifício (ensaio 7) para compreender e avaliar o comportamento global da estrutura. Este ensaio foi realizado por um consórcio de investigadores, onde se incluía a Universidade de Coimbra.

Os resultados obtidos nos ensaios 6 e 7 são os que mais se assemelham à realidade, visto que para simular uma situação de incêndio fidedigna, foram colocados equipamentos electrónicos e mobiliários normalmente encontrados neste tipo de utilização, aumentando o nível de carga de incêndio.

O compartimento onde o incêndio deflagrou apresentava uma área em planta de 77 m<sup>2</sup>, com uma carga total de incêndio de 40 kg/m<sup>2</sup> (Wald et al., 2006). O ensaio 7 teve como cenário um compartimento central do quarto piso, com dimensões em planta de 11 m de largura por 7 m de profundidade. Uma abertura de 9 m de largura e 1.27 m de altura localizada na fachada serviu para garantir a normal ventilação do compartimento. As condições de protecção térmica dos elementos estruturais foram semelhantes às verificadas no ensaio 6. Durante este ensaio, aos 54 minutos foi registada a temperatura máxima que atingiu os 1107°C. Relativamente às vigas de aço, as não protegidas alcançaram os 1087.5°C. Nas ligações, a temperatura máxima chegou aos 200°C. De seguida, apresenta-se a figura 2.3, que resume num gráfico a variação de temperaturas registadas na laje mista (Wald et al., 2006).

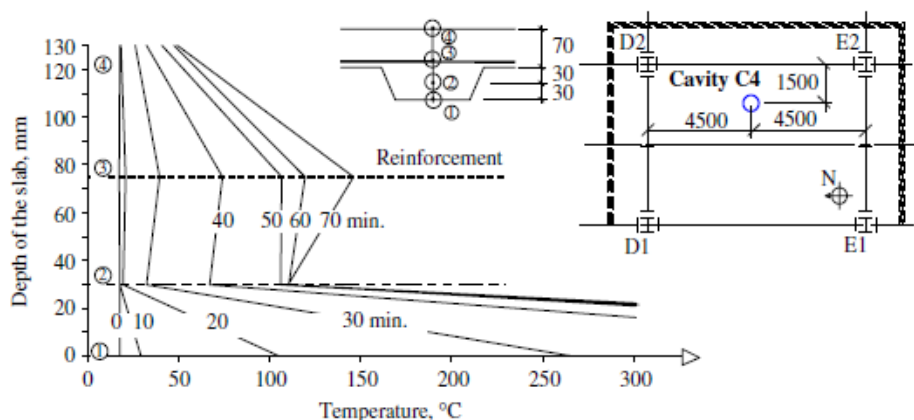


Figura 2.3 – Variação de temperaturas da laje mista (Wald et al., 2006).

Da análise deste gráfico, verifica-se que a temperatura máxima da face não exposta da laje mista apresenta valores inferiores a 100°C, o que significa que são cumpridos os critérios de isolamento. Quanto às deformações registadas do pavimento, os valores máximos atingem os 1200 mm sem a estrutura colapsar. Numa fase posterior à fase de aquecimento, a deformação residual foi de 925 mm (Wald et al., 2006).

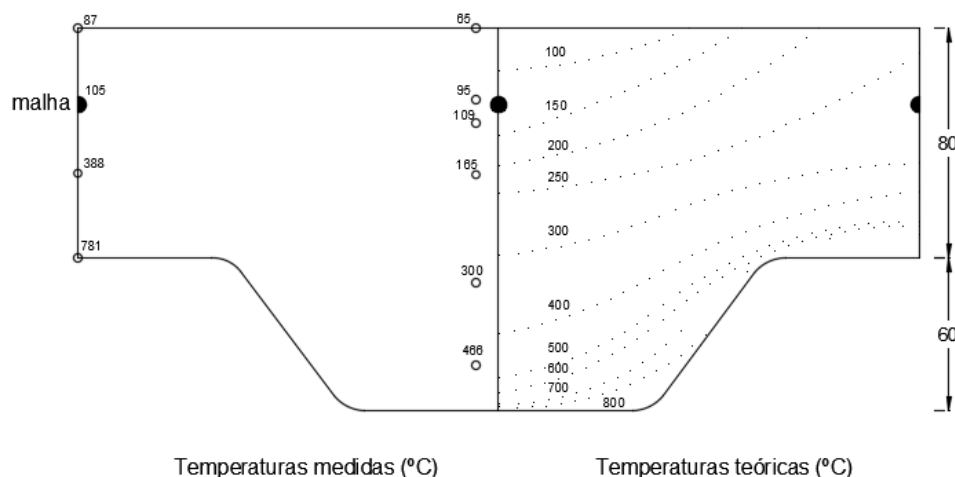
#### 2.2.4 Estudos numéricos e analíticos

Como foi referido anteriormente, a vertente da engenharia civil de cálculo estrutural em situação de incêndio era, há bem pouco tempo, uma área carente em termos de investigação. Apesar dos dados recolhidos em testes ao fogo realizados e descritos nos sub-capítulos 2.2.1,

2.2.2 e 2.2.3, estes caracterizam-se por serem muito dispendiosos e morosos. Assim, surgiu a necessidade de investigar o comportamento das estruturas mistas ao fogo, através de estudos numéricos efectuados em programas de cálculo automático desenvolvidos na altura. Inicialmente, as investigações concentraram-se no desenvolvimento de métodos predictivos que simulassem o comportamento real das estruturas mistas, de modo a obter uma estimativa da resistência ao fogo (Wang, 2002).

Estudos numéricos mais recentes apontam para a preocupação dos investigadores em desenvolver métodos que analisem a estrutura na íntegra. Foi e é ainda hoje fundamental, para a obtenção de valores precisos, analisar as estruturas globalmente considerando as interacções entre membros estruturais quando sujeitos a elevadas temperaturas. Surge assim, o Método dos Elementos Finitos considerado um método numérico fiável que modela estruturas tendo em conta as condições de fronteira existentes, as cargas actuantes e as condições de exposição ao fogo (Wang, 2002).

A Universidade de Aston, no Reino Unido, levou a cabo um estudo numérico de uma laje mista, com 140 mm de altura em betão normal, cujo objectivo era simular no programa *FIRES-T* o fluxo de calor através desta. Com o intuito de comparar os resultados obtidos com os do teste CIRIA 5 (ver quadro 2.1), a laje modelada foi projectada para uma resistência ao fogo de 90 minutos. De seguida, é apresentado um gráfico (figura 2.4) com a evolução das temperaturas obtidas numericamente e por via experimental (Cooke et al., 1988).



Comparação das temperaturas a 90 minutos numa laje de betão normal  
Forno a 960°C

Figura 2.4 – Comparação das temperaturas obtidas na secção transversal da laje mista por via experimental e numérica (Cooke et al., 1988).

Da observação da figura 2.4, os investigadores comprovaram que apesar das temperaturas obtidas no modelo numérico serem ligeiramente superiores às temperaturas correspondentes do teste CIRIA 5, estas continuavam dentro dos limites estabelecidos pela norma inglesa BS 476. No entanto, há que ter em conta que o modelo desenvolvido computacionalmente não considerava o efeito da humidade presente na laje, facto que justifica esta diferença de valores (Cooke et al., 1988).

## 2.3 Legislação existente

### 2.3.1 Introdução

Com a evolução da tecnologia e dos materiais presentes nas estruturas, para melhorar o conforto dos seus utilizadores, o modo de projectar estruturas e edifícios sofreu, em todo o mundo, grandes alterações após a necessidade de considerar alguns requisitos impostos pelos legisladores de cada país.

Salvo raras excepções, como o exemplo do Reino Unido ou França com regulamentos próprios, todos os projectos inseridos na Europa regem-se pelos Eurocódigos, que servem essencialmente para orientar os projectistas com base em métodos prescritivos ou procedimentos baseados no desempenho observado em testes (Vila Real, 2003). Por outro lado, existem documentos que são essencialmente constituídos por leis às quais os projectistas têm cumprir. Em Portugal dá-se o exemplo do RJ-SCIE – Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (Decreto Lei nº 220/2008) – e o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (Portaria nº 1532/2008). Estes dois ganham importância quando há necessidade de classificar os edifícios consoante a sua utilização entre doze categorias de risco diferentes (ver quadro 2.2), sendo que depois, esta classe irá dar origem à resistência ao fogo mínima exigida (ver quadro 2.3).

Quadro 2.2 – Quadro de categorias de risco definidas no Regulamento Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios – Decreto Lei nº 220/2008, Artigo 8º).

Utilização - tipo dos edifícios e recintos	
Tipo I	Habitacionais
Tipo II	Estacionamento
Tipo III	Administrativo
Tipo IV	Escolares
Tipo V	Hospitais e lares de idosos
Tipo VI	Espectáculos e reuniões públicas
Tipo VII	Hoteleiros e restauração
Tipo VIII	Comerciais e gares de transportes
Tipo IX	Desportivos e de lazer
Tipo X	Museus e galerias de arte
Tipo XI	Bibliotecas e arquivos
Tipo XII	Industriais, oficinas e armazéns

Relativamente ao cálculo da resistência ao fogo, a regulamentação existente avalia e classifica o comportamento ao fogo dos mais variados elementos segundo três critérios distintos representados pelas letras R – capacidade resistente de carga ou *loadbearing capacity*, E – estanquidade ou *integrity* e por fim, o critério de isolamento I – *insulation*. O primeiro, tal como o nome indica, relaciona-se com a capacidade da estrutura se manter durante um determinado tempo. O requisito de isolamento limita a transmissão de calor entre compartimentos por condução e o critério de estanquidade controla a passagem de chamas e fumos na envolvente. Consoante o que for imposto, seja por motivos de legislação ou a pedido dos donos de obra, as estruturas e os elementos que a compõem devem ser dimensionados de modo garantir um ou vários destes três critérios durante um certo período de tempo. Surgem assim as classes de resistência ao fogo, mencionadas anteriormente, que obrigam as estruturas a manter as suas funções de suporte de carga, isolamento e estanquidade durante todas as fases que caracterizam um incêndio. A classificação de um edifício é normalmente identificada por uma ou mais letras representativas dos critérios, seguido de um número em minutos que pode variar dos 30 aos 180. A partir do quadro 2.3, dando o exemplo de um edifício habitacional de categoria de risco 1, a resistência ao fogo padrão mínima deverá ser R 30 ou REI 30, o que significa que durante 30 minutos, o edifício deverá manter a estabilidade estrutural, permitindo a evacuação do utilizadores de forma segura, não deixando que as chamas e fumos se propaguem para os restantes compartimentos ou mesmo para estruturas vizinhas.

Quadro 2.3 – Quadro de resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais segundo a utilização-tipo (Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios - Portaria nº 1532/2008, Artigo 15º).

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

A legislação impõe ainda limites mínimos de resistência, estanquidade e isolamento para elementos estruturais individuais, independentes da sua categoria de risco. No Anexo II do Regime Jurídico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Decreto Lei nº220/2008), estabelece-se uma classificação da resistência ao fogo padrão consoante o elemento em causa e a sua função. Para o caso de pavimentos com funções de suporte de carga e de compartimentação resistente ao fogo, as resistências mínimas a assegurar são R 30, RE 20 ou REI 15 (ver quadro 2.4).



Quadro 2.4 – Classes de resistência ao fogo padrão mínima de pavimentos e coberturas  
(Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios – Decreto Lei nº 220/2008,  
Anexo II, Quadro II).

Aplicação: pavimentos e coberturas										
Normas: EN 13501-2; EN 1365-2; EN 1992-1-2; EN 1993-1-2; EN 1994-1-2; EN 1995-1-2; EN 1999-1-2										
Classificação	Duração em minutos									
R	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-
RE	-	20	30	-	60	90	120	180	240	360
REI	15	20	30	45	60	90	120	180	240	360

### 2.3.2 Exigências regulamentares

A elaboração das partes 1-2 dos Eurocódigos existentes, com os seus requisitos e métodos de dimensionamento de estruturas ao fogo, teve como principal objectivo tornar as estruturas cada vez mais eficientes em caso de incêndio, com menor gasto financeiro. No âmbito desta dissertação, dar-se-á uma especial atenção à EN 1994-1-2, que se foca nas estruturas mistas e que pretende dar resposta a exigências básicas de limitação da propagação de chamas e fumos, protecção da envolvente, evacuação rápida das pessoas e salvaguarda da estabilidade da construção durante um certo tempo imposto no projecto.

Geralmente e de forma resumida, o dimensionamento de estruturas mistas ao fogo segue uma metodologia prescritiva com os seguintes passos:

1. Determinação das acções mecânicas e térmicas;
2. Cálculo da temperatura máxima no ar;
3. Cálculo da temperatura máxima nos elementos (aço e betão);
4. Verificação da estabilidade e resistência estrutural.

Para o cálculo das acções e combinações, recorre-se aos Eurocódigos 0 e 1. Como primeiro passo, pretende-se obter o valor das acções térmicas originadas pelo fogo e das acções mecânicas, que compreendem as cargas permanentes, sobrecargas de utilização e vento. Relativamente aos passos 2 e 3, consoante o cenário e condições de incêndio, podem ser usadas várias curvas de aquecimento estipuladas no Eurocódigo 1. Estas curvas dividem-se em duas categorias distintas: as curvas de incêndio nominais e as curvas de incêndio paramétricas. Do primeiro grupo fazem parte a curva ISO 834 ou padrão, a curva para elementos exteriores e a curva de hidrocarbonetos, que podem ser expressas através de fórmulas simples e são completamente independentes da dimensão ou utilização-tipo das estruturas. As curvas pertencentes à segunda categoria distinguem-se das primeiras pela consideração de uma fase de arrefecimento e pela sua dependência relativamente a certos

factores. Estas curvas aproximam-se das condições reais de incêndio e por isso, têm em conta a carga de incêndio actuante, condições de ventilação (dimensão e localização das aberturas) e as características dos materiais que cobrem as paredes do compartimento. O cálculo da evolução das temperaturas no ar e nos elementos é directo, pois como já foi mencionado, cada curva apresentada na figura 2.5 é aproximada por uma equação presente na mesma regulamentação (EN 1991).

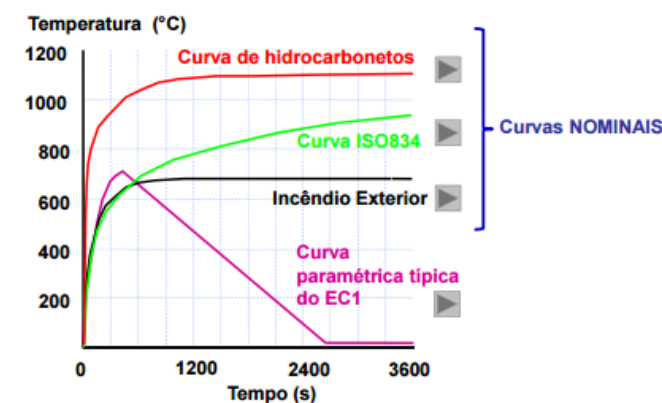


Figura 2.5 – Curvas de incêndio presentes no Eurocódigo 1.

O estudo do comportamento das lajes mistas analisadas neste projecto será feito com base na curva de incêndio padrão ISO 834, de forma a permitir a comparação com os resultados obtidos com outros estudos anteriormente realizados e também pelo facto das equações regulamentares terem sido desenvolvidas com base nesta. Esta curva é caracterizada por não depender da carga de incêndio e condições de ventilação e por não considerar uma fase de *pré-flashover* e de arrefecimento. Na quarta etapa de verificação da resistência estrutural, segundo a EN 1994-1-2, existem três formas de fazer o cálculo estrutural ao fogo:

- através de Tabelas elaboradas com os resultados obtidos em ensaios e testes efectuados, ou seja, uma abordagem baseada no comportamento dos elementos que se entende como expectável (cláusula 4.2);
- utilizando Métodos Simplificados baseados em formas analíticas e pressupostos conservativos (cláusula 4.3);
- por meio de Métodos Avançados muito precisos mas que exigem conhecimento técnico e envolve um elevado número de cálculos, o que torna esta opção pouco apelativa (cláusula 4.4).

Como se verificará adiante no capítulo 3, a avaliação regulamentar será efectuada seguindo o procedimento apresentado na EN 1994-1-2 (CEN 2005) cláusula 4.3 do Método Simplificado. Para lajes mistas dimensionadas segundo o Método de Cálculo Simplificado, a

cláusula 4.3.2 (5) inserida na EN 1994-1-2, indica que a resistência mínima ao fogo que estes elementos apresentam é R30. Este limite baseia-se em dados recolhidos a partir de numerosos testes e ensaios, sujeitos à curva de incêndio ISO 834, que repetidamente foram demonstrando que os primeiros sinais de colapso surgiam geralmente após os 30 minutos. Este valor é considerado também como aceitável, em edificações de dimensões normais, para que as pessoas e bens materiais de valor possam ser evacuados com segurança.

## **2.4 Materiais e sistemas de melhoramento da resistência ao fogo**

### **2.4.1 Introdução**

Devido à elevada conductividade do aço, a sua capacidade resistente é altamente sensível a aumentos de temperatura, podendo esta ser reduzida em 70% para temperaturas que rondam os 700°C (EN 1993-1-2, CEN 2005). É bastante comum encontrar-se elementos estruturais em construções mistas, tais como vigas, que apresentem secções transversais muito esbeltas, o que por sua vez também contribui para que a temperatura se propague muito rapidamente.

Em caso de incêndio, elementos metálicos que não se encontrem protegidos, atingem facilmente temperaturas acima dos 700°C, o que como já vimos, contribui para uma drástica diminuição da rigidez e resistência das estruturas levando-as ao colapso. Para lajes mistas dimensionadas de acordo com o procedimento presente na EN 1994-1-2, é assegurada uma resistência ao fogo de 30 minutos sem que seja necessário recorrer a medidas adicionais. No entanto, quando o tipo de utilização exige que seja satisfeita uma capacidade resistente superior a esta (60 minutos ou superior) os projectistas são obrigados a adoptar técnicas de protecção contra o fogo que passam por reforços adicionais dispostos ao longo das lajes, aplicação de camadas de tintas intumescentes ou até mesmo o uso de tectos falsos.

Quando o projectista recorre a técnicas de protecção de elementos metálicos como tintas ou *sprays*, deve ter em conta o elevado custo que estas introduzem no valor da obra. Existem estudos que mostram que a utilização deste tipo de protecção pode chegar a representar 40% do custo total da estrutura metálica (Wang, 2002). Assim, um dos objectivos desta dissertação surge no âmbito desta temática para desenvolver formas mais económicas e inovadoras de aumentar a capacidade resistente das lajes mistas, sem recorrer a práticas dispendiosas que afectam negativamente a posição das estruturas metálicas no mercado.

Existem já várias técnicas de protecção comercializadas e que se descrevem de forma resumida nos subcapítulos 2.4.2 e 2.4.3. Estas podem ser agrupadas em dois grupos: activas ou passivas.

## 2.4.2 Medidas activas

As medidas que aqui se enquadram dependem da proximidade de uma unidade de bombeiros do local e do tempo de resposta em caso de incêndio, da existência de dispositivos detectores de fumo espalhados pelos vários compartimentos de um edifícios ou da utilização de *sprinklers*.

Como exemplo, os *sprinklers* (ver figura 2.6) são dispositivos ligados a condutas de água, normalmente dimensionadas na parte do combate a incêndios num projecto, localizados estrategicamente junto as elementos estruturais. Quando a temperatura no compartimento atinge um determinado valor, estes aparelhos são accionados (Vila Real, 2003).



Figura 2.6 – Dispositivo *sprinkler*.

## 2.4.3 Medidas passivas

### 2.4.3.1 Sistemas de protecção com aumento da resistência à temperatura ambiente e em situação de incêndio

Uma das medidas que pode ser adoptada é a de aumentar a quantidade de aço presente nos elementos. Ou seja, ao optar por secções transversais maiores, a massividade aumenta o que, por sua vez, dificulta a propagação da temperatura. Adicionalmente, obtém-se uma maior resistência às condições da temperatura ambiente.

A colocação de barras longitudinais de reforço nas nervuras constitui outra forma de aumentar a resistência ao fogo em lajes mistas. Com a possibilidade de fazer variar o número de varões longitudinais, a sua posição na secção transversal da laje ou até mesmo o seu diâmetro, existe um número infinito de configurações possíveis com um baixo custo associado. Por se tratar de uma técnica económica e sustentável, é alvo de estudo no âmbito desta dissertação. O objectivo é que as barras de aço longitudinais exerçam uma função de reforço de armadura à tracção, em caso de incêndio e à temperatura ambiente, protagonizada pela chapa metálica colaborante, diminuindo assim as deformações e evitando o colapso precoce.

O betão é um material pesado caracterizado pela sua grande capacidade de absorver calor. Normalmente é usado como material de protecção térmico envolvendo os perfis metálicos, global ou parcialmente (ver figura 2.7), limitando a propagação de elevadas temperaturas nos elementos. Esta técnica é particularmente interessante porque o betão confere uma grande durabilidade à estrutura em caso de choques violentos, tanto a temperaturas elevadas como à temperatura ambiente (Vila Real, 2003).

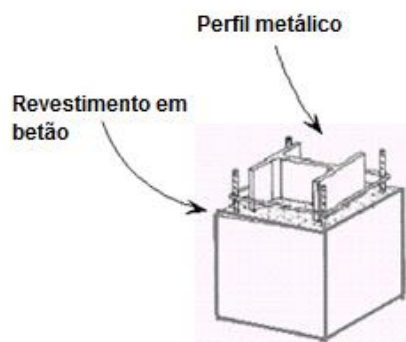


Figura 2.7 – Aplicação do betão como material de protecção contra o fogo.

#### 2.4.3.2 Sistemas de protecção com aumento da resistência em situação de incêndio

A aplicação de gesso sobre os elementos é outra técnica de protecção possível e existente no mercado, comercializado sob a forma de placas rígidas. A água presente na sua constituição, quando exposta a elevadas temperaturas, absorve calor e vaporiza, impedido a difusão do fluxo térmico. No entanto, não se trata de um material muito resistente quando exposto a condições agressivas (ver figura 2.8 a).

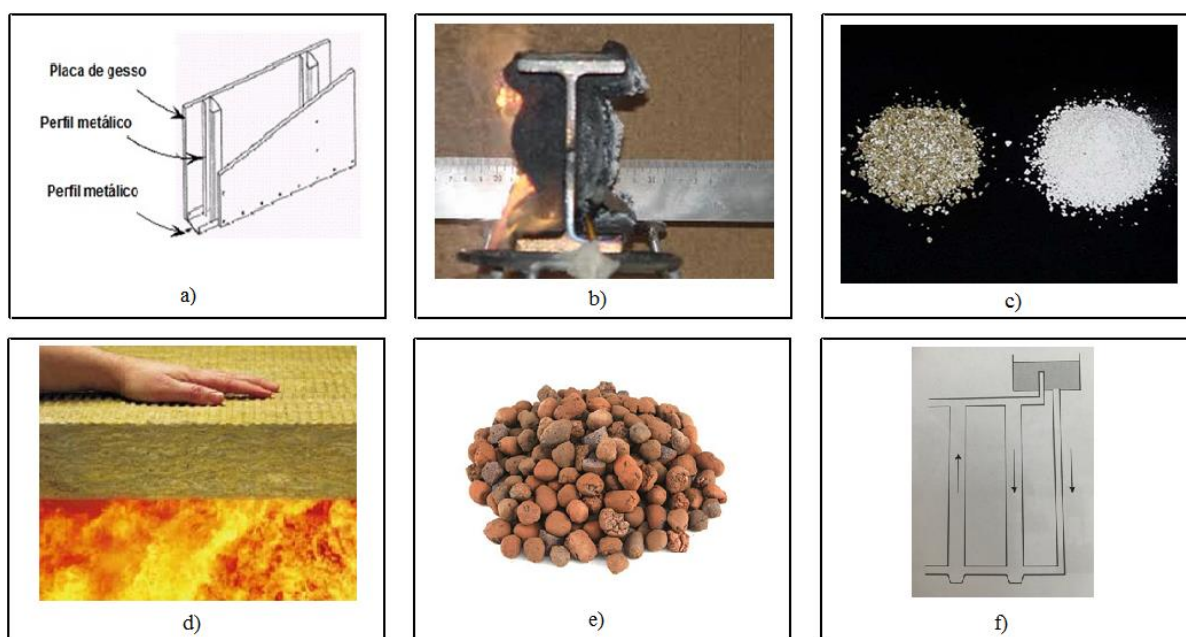
As tintas intumescentes, embora onerosas, continuam a ser bastante utilizadas na protecção contra incêndios. Graças à sua composição química, quando atingem temperaturas elevadas têm tendência a aumentar de volume, dando origem a uma espessa camada protectora que pode atrasar até duas horas o instante em que o perfil metálico atinge a sua temperatura crítica (Vila Real, 2003). A sua aplicação passa por três fases distintas: alisamento e uniformização da superfície metálica, aplicação de primário anti-corrosão e pintura. A vertente estética é uma das grandes vantagens desta técnica. Com a possibilidade de adoptar várias cores e a existência de catálogos dos fabricantes que consoante a espessura da camada fornecem o tempo de resistência, as tintas continuam a ser bastante utilizadas (ver figura 2.8 b).

A vermiculite e a perlite são minerais que possuem características expansivas quando expostas a uma fonte de calor. Integrados no cimento, estes minerais dão origem a argamassas projectadas que apresentam grande resistência ao fogo sem produção de gases tóxicos (ver figura 2.8 c).

A lã de rocha ou lã de vidro são fibras minerais artificiais, geralmente vendidas em forma de manta, que evitam a propagação do calor através de um fluxo de vapor que passa através de um líquido obtido de rochas ou cinzas vulcânicas (ver figura 2.8 d).

A argila expandida é um material granulado muito resistente qualificado como fraco condutor de calor (ver figura 2.8 e). A aplicação desta protecção pode ser feita através de blocos pré-fabricados de betão leve, colocados em torno do elemento a proteger, pode ser despejada a granel entre o elemento e respectiva cofragem, ou integrada no betão leve, posteriormente aplicado em obra (Vila Real, 2003).

O conceito de estruturas irrigadas representa outra técnica menos usual de protecção contra incêndios. O mecanismo é constituído por perfis tubulares ocos onde circula água que fará baixar a temperatura nos elementos. Este engenho é accionado pelo aquecimento provocado pelo incêndio, que dá origem a uma circulação descendente de água fria proveniente de reservatórios colocados no telhado dos edifícios (ver figura 2.8 f).



<sup>(1)</sup> Imagem b) disponível em <http://www.cin-protective.com/>; c) disponível em <http://www.jardisen.cl/parts/vermic.htm>; d) disponível em <https://portuguese.alibaba.com/product-gs/rockwool-fireproof-insulation-roof-panel-fireproof-glass-wool-insulation-rock-wool-acoustic-wall-panel-60174560083.html> e e) disponível em [http://www.leroymerlin.com.br/argila-expandida-20kg\\_87328570](http://www.leroymerlin.com.br/argila-expandida-20kg_87328570) - retiradas em 16.05.2016; Imagem f) - (Vila Real, 2003).

## 3 AVALIAÇÃO REGULAMENTAR

### 3.1 Conceitos gerais

Este capítulo de avaliação regulamentar tem como principal objectivo apresentar o cálculo da resistência ao fogo de lajes mistas em condições de incêndio normalizado. O método simplificado integrado na EN 1994-1-2, capítulo 4.3, baseia-se numa abordagem prescritiva. Este método é válido apenas para condições de incêndio padrão; aplica-se neste caso a lajes de um tramo e contínuas, com ou sem reforço longitudinal. Sendo um método simplificado, o cálculo baseia-se nas aproximações listadas de seguida:

- a distribuição de temperaturas tem por base regras convencionais obtidas de testes efectuados em condições de incêndio padrão;
- a capacidade resistente baseia-se na teoria elementar da plasticidade;
- a capacidade resistente da chapa metálica quando sujeita a elevadas temperaturas não é considerada.

A consideração destas aproximações traz algumas implicações no cálculo de lajes mistas. Descrevem-se algumas abaixo:

- pelo facto de as regras de distribuição da temperatura serem obtidas a partir de um pequeno número de testes, a forma e dimensões da chapa metálica exercem pouca influência;
- a teoria elementar da plasticidade apenas é válida e pode ser considerada se houver capacidade de deformação suficiente;
- a hipótese de não contribuição da chapa colaborante a elevadas temperaturas para a capacidade de suporte da laje mista é muito conservadora. Dados obtidos em ensaios provam que após 30 minutos de exposição ao fogo, a chapa continua a suportar as cargas actantes.

O procedimento que a seguir se expõe segue as exigências de dimensionamento ao fogo da EN 1994-1-2. Quando conveniente, far-se-á referência no texto a outros Eurocódigos, Anexos Nacionais ou documentos.

## 3.2 Cálculo de acções e combinações de dimensionamento

### 3.2.1 Introdução

À semelhança do cálculo estrutural à temperatura ambiente, em caso de incêndio é necessário determinar as habituais acções mecânicas que abrangem o peso próprio, as restantes cargas permanentes, as sobrecargas-tipo de utilização, a acção do vento, entre outras. Adicionalmente, por estarmos a trabalhar com temperaturas muito acima das que se verificam nas condições ambiente, é necessário considerar as acções térmicas induzidas pelo incêndio.

### 3.2.2 Acções mecânicas

As acções mecânicas mencionadas acima podem ser determinadas com base na EN 1990 (CEN 2002). Considerando o exemplo de uma laje mista simplesmente apoiada, as acções a quantificar são o peso próprio total da laje, as restantes cargas permanentes que incluem os revestimentos e a sobrecarga de utilização consoante o tipo de estrutura que se considera. O peso próprio depende essencialmente da espessura da chapa escolhida e da altura total da laje. As fichas técnicas de lajes mistas fornecidas pelos fabricantes de chapas metálicas apresentam os pesos próprios da chapa e do betão consoante a configuração das variáveis anteriormente mencionadas. Apresenta-se de seguida um exemplo de cálculo com recurso aos quadros 3.1 e 3.2. As células a amarelo dizem respeito aos valores do exemplo de estudo em causa.

1. Escolha do tipo de chapa e respectiva espessura: H60 1.0 mm
2. Escolha da altura total da laje mista: 150 mm
3. Consulta das tabelas de pesos próprios fornecidas pelos fabricantes:

Quadro 3.1 – Pesos próprios em  $\text{kN/m}^2$  para as diferentes espessuras da chapa metálica H60, fornecidos pelo fabricante.

Espessura da chapa (mm)	Peso próprio ( $\text{kN/m}^2$ )
0.7	0.078
0.8	0.089
1.0	0.111
1.2	0.134

Quadro 3.2 – Volume e pesos próprios do betão para lajes mistas com chapa H60, consoante a altura total  $h_t$ , fornecidos pelo fabricante.

Volume e peso próprio do betão - lajes mistas:																
$h_t$ (cm)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Volume ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	0.064	0.074	0.084	0.094	0.104	0.114	0.124	0.134	0.144	0.154	0.164	0.174	0.184	0.194	0.204	0.214
Peso ( $\text{kN/m}^2$ )	1.6	1.85	2.1	2.35	2.6	2.85	3.1	3.35	3.6	3.85	4.1	4.35	4.6	4.85	5.1	5.34



Com uma laje de altura total igual a 150 mm e uma chapa H60 de espessura igual a 1.0 mm, o peso próprio total da laje mista vem igual a:  $PP_{total} = 0.111 + 2.85 = 2.961 \text{ kN/m}^2$ .

As restantes cargas permanentes estão normalmente associadas a revestimentos ou equipamentos fixos. Dependem essencialmente do tipo de utilização da estrutura mas como simplificação, consideram-se entre a gama de valores de  $1.5 \text{ kN/m}^2$  a  $2.5 \text{ kN/m}^2$ . A sobrecarga de utilização, tal como o nome indica depende da utilização tipo (habitação, escritórios, etc.) e pode ser facilmente retirada do quadro 6.2 presente na EN 1991-1-1, cláusula 6.3.1.2 (1) (CEN 2002).

É importante referir que no caso de lajes de cobertura, a acção do vento deve ser quantificada. No entanto, para a verificação ao fogo, esta acção acaba por se tornar pouco relevante na estrutura (ver equação (3) e quadro 3.4:  $\Psi_2 \text{ VENTO} = 0.0$ ).

### 3.2.3 Acções térmicas

As acções térmicas são definidas na EN 1991-1-2 (CEN, 2002) e permitem a avaliação e determinação da evolução das temperaturas nos elementos. Para que isto seja possível, é necessário calcular a evolução das temperaturas no ar. Tal como referido, a curva da temperatura aqui adoptada foi a curva ISO 834. Esta curva é definida através de uma equação simples e directa, independente da dimensão ou tipologia das estruturas (Vila Real, 2003):

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

Em que:

$t$  – tempo de incêndio, em minutos.

A evolução das temperaturas apresenta-se no gráfico ilustrado na figura 3.1.

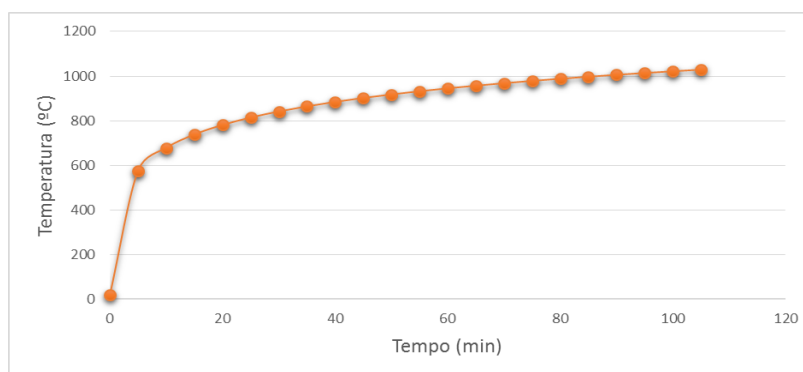


Figura 3.1 – Evolução da temperatura no ar, ao longo do tempo, segundo a curva ISO 834.

### 3.2.4 Combinações de acções e cálculo dos esforços

A combinação de acções a considerar à temperatura ambiente é apresentada na EN 1990 cláusula 6.4.3.2 (3) e é expressa da seguinte forma:

$$\Sigma \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

Onde os coeficientes  $\gamma_G$  e  $\gamma_Q$  são tomados como 1.35 e 1.50, respectivamente.  $G_k$  é dado pela soma das cargas do peso próprio total e das restantes cargas permanentes. Por sua vez,  $Q_k$  resulta apenas da sobrecarga de utilização.

Em situação de incêndio, a combinação de acções utilizada é a combinação accidental, presente na EN 1990 cláusula 6.4.3.3 (2):

$$\Sigma G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ ou } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

No quadro 3.3, são apresentados os valores dos coeficientes de combinação  $\psi_1$  e  $\psi_2$  retirados da EN 1990, Anexo A1.

Quadro 3.3 – Coeficientes de combinação  $\psi_1$  e  $\psi_2$  consoante a acção variável a considerar.

Acção Variável	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Sobrecarga de utilização</b>		
Categoria A	0.5	0.3
Categoria B	0.5	0.3
Categoria C	0.7	0.6
Categoria D	0.7	0.6
Categoria E	0.9	0.8
Categoria F	0.7	0.6
Categoria G	0.5	0.3
Categoria H	0.0	0.0
Neve	0.2	0.0
Vento	0.2	0.0
Temperatura não resultante de incêndio	0.5	0.0

Tomando como exemplo um edifício de escritórios onde a sobrecarga de utilização é considerada como acção variável base, a combinação pode ser simplificada da seguinte forma:

$$1.0 G_k + 0.5 Q_{k,1} \quad (4)$$

Contudo, para simplificar os cálculos e reduzir o volume de combinações a considerar, a EN 1993-1-2 admite a consideração de um factor de redução  $\eta_{fi}$  que permite a obtenção do

valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio,  $E_{fi,d,t}$ , através do valor de cálculo dos efeitos das acções determinado à temperatura ambiente,  $E_d$ .

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d \quad (5)$$

Este factor pode ser calculado da seguinte forma:

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

No entanto, tendo em conta a cláusula 2.4.2 (3) da EN 1994-1-2, este factor pode ser simplificado considerado igual a 0.65, exceptuando edifícios de categoria E, onde  $\eta_{fi} = 0.7$ . Assim, após determinar os esforços relevantes à temperatura ambiente, obtém-se pela multiplicação deste factor de redução os esforços em situação de incêndio, tornando a equação (3) dispensável.

### 3.3 Cálculo das temperaturas nos elementos

#### 3.3.1 Introdução

Neste subcapítulo, descreve-se o processo de cálculo da evolução das temperaturas nos diferentes materiais presentes nas lajes mistas (aço estrutural, aço de armaduras e betão) com base nas equações simplificadas sugeridas no Anexo D da EN 1994-1-2.

#### 3.3.2 Evolução das temperaturas com o tempo para o cálculo do momento resistente positivo

##### 1. Temperaturas nas diferentes partes da chapa colaborante:

De acordo com a geometria dos perfis das chapas, é lógico registarem-se valores de temperaturas diferentes consoante se esteja a considerar o banzo inferior, superior ou a alma da chapa. A equação que possibilita este cálculo surge no Anexo D, EN 1994-1-2, D.2 (1):

$$\theta_a = b_0 + b_1 \cdot (l/l_3) + b_2 \cdot (A/L_r) + b_3 \cdot \Phi + b_4 \cdot \Phi^2 \quad [^\circ\text{C}] \quad (7)$$

Em que:

$b_0, b_1, b_2, b_3$  e  $b_4$  – factores retirados do quadro 3.5;

$l_3$  – largura do banzo superior da chapa em mm, ver figura 3.2;

$A/L_r$  – factor geométrico da nervura em mm, ver equação (8);

$\Phi$  – ver equação (9).

Os valores dos factores  $b_i$  correspondentes a cada parte da chapa são apresentados no quadro 3.4, retirados da tabela D.2 Anexo D, EN 1994-1-2 (Nota: houve necessidade de efectuar extrapolações para determinar os factores no caso de R30 e R180. Os valores apresentados referem-se a betão normal).

Quadro 3.4 – Coeficientes para a determinação das temperaturas nas diferentes partes da chapa metálica.

Resistência ao fogo / Parte da chapa		$b_0$ [°C]	$b_1$ [°C].mm	$b_2$ [°C].mm	$b_3$ [°C]	$b_4$ [°C]
30	Banzo inferior	883.99	-1555.01	-3.09	107.70	-193.30
60		951	-1197	-2.32	86.40	-150.70
90		1018	-839	-1.55	65.10	-108.10
120		1063	-679	-1.13	46.70	-82.80
180		1218.94	234.94	0.77	1.20	19.70
30	Alma	506	-707	-3.71	610.50	-363.60
60		661	-833	-2.96	537.70	-351.90
90		816	-959	-2.21	464.90	-340.20
120		925	-949	-1.82	344.20	-267.40
180		1281	-1337	0.04	246.49	-305.10
30	Banzo superior	62	-3752	-3.44	1528.91	-887.60
60		340	-3269	-2.62	1148.40	-679.80
90		618	-2786	-1.79	767.90	-472
120		770	-2460	-1.67	592.60	-379
180		1452	-1337	0.71	-373.54	151.41

Apresenta-se na figura 3.2 a simbologia utilizada para lajes com chapa trapezoidal (EN 1994-1-2 cláusula 4.3.2 (3)), cujos parâmetros estão limitados à gama de valores indicada no quadro 3.5.

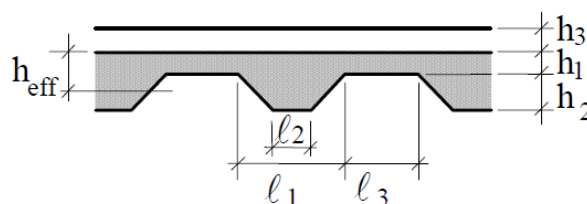


Figura 3.2 – Simbologia para lajes mistas com chapa trapezoidal.

Quadro 3.5 – Limites para os parâmetros geométricos indicados na figura 3.2.

Limites aplicáveis da geometria das lajes mistas desprotegidas					
80.0	≤	$l_1$	≤	155.0	mm
32.0	≤	$l_2$	≤	132.0	mm
40.0	≤	$l_3$	≤	115.0	mm
50.0	≤	$h_1$	≤	125.0	mm
50.0	≤	$h_2$	≤	100.0	mm

Nota: embora estes limites sejam somente aplicáveis a lajes mistas com chapas metálicas H60, assume-se uma aproximação ao considerar lajes com chapas H120.

O factor geométrico da nervura,  $A/L_r$ , é calculado com a equação (Anexo D EN 1994-1-2):

$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \cdot \frac{l_1 + l_2}{2}}{l_2 + 2 \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)^2}} \quad [-] \quad (8)$$

Em que:

$h_1$ ,  $h_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$  – parâmetros geométricos expressos em mm, ver figura 3.2.

Da mesma forma, o Anexo D da EN 1994-1-2 fornece uma equação simplificada para o factor  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{\sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 + l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2}}{l_3} \quad [-] \quad (9)$$

Em que:

$h_1$ ,  $h_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$  – parâmetros geométricos expressos em mm, ver figura 3.2.

## 2. Temperaturas nos varões longitudinais:

Se se prever a introdução de varões longitudinais nas nervuras da chapa, o cálculo da temperatura nestes é efectuado com a seguinte equação (Anexo D EN 1994-1-2 D.2 (3)):

$$\Theta_s = c_0 + (c_1 \cdot (u_3/h_2)) + (c_2 \cdot z) + (c_3 \cdot (A/L_r)) + (c_4 \cdot \alpha) + (c_5 \cdot (l/l_3)) \quad [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

Em que:

$c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$  e  $c_5$  – factores retirados do quadro 3.7;

$u_3$  – distância do varão longitudinal ao banzo inferior da chapa, em mm;

$h_2$  – altura da chapa, ver figura 3.2;

$z$  – factor indicativo da posição do varão na nervura em  $\text{mm}^{-0.5}$ , ver equação (11);

$\alpha$  – ângulo da alma em graus ( $^\circ$ ), ver figura 3.3;

$l_3$  – largura do banzo superior da chapa em mm, ver figura 3.2.

Os factores  $c_i$  são, à semelhança dos factores  $b_i$ , fornecidos no Anexo D da EN 1994-1-2 D.2 (3) e apresentados na tabela seguinte, para betão normal.

Quadro 3.6 – Coeficientes para a determinação das temperaturas nos varões longitudinais colocados nas nervuras.

Resistência ao fogo	$c_0$ [°C]	$c_1$ [°C]	$c_2$ [°C].mm <sup>0.5</sup>	$c_3$ [°C].mm	$c_4$ [°C/°]	$c_5$ [°C].mm
30	1039.99	-244	-244.99	-4.72	0.69	-583
60	1191	-250	-240	-5.01	1.04	-925
90	1342	-256	-235	-5.30	1.39	-1267
120	1387	-238	-227	-4.79	1.68	-1326
180	1794.99	-274	-219.99	-6.18	2.45	-2293

Os parâmetros relativos à posição dos varões longitudinais são indicados na figura 3.3.

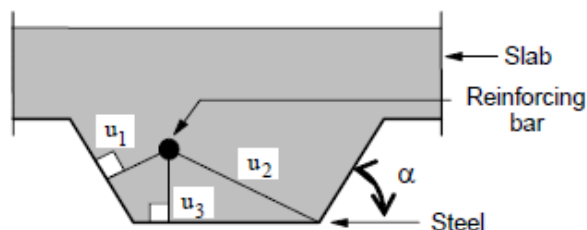


Figura 3.3 – Parâmetros indicativos da posição dos varões longitudinais nas nervuras.

O factor  $z$  pode então ser determinado através da equação (11):

$$\frac{1}{z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad [1/\text{mm}^{-0.5}] \quad (11)$$

Em que:

$u_1$  e  $u_2$  – distância mais curta entre o centro do varão e qualquer ponto das almas da chapa metálica, em mm;

$u_3$  – distância do varão longitudinal ao banzo inferior da chapa, em mm.

### 3. Temperatura no betão:

O Anexo D da EN 1994-1-2 D.2 não faz qualquer referência ao cálculo das temperaturas no betão para o cálculo do momento resistente positivo em situação de incêndio. No entanto, devido à variação das propriedades mecânicas do betão com a evolução das temperaturas, é necessário estimar as temperaturas para nos aproximarmos o mais possível da realidade física. Para colmatar esta falta de informação, e tendo em conta as aproximações a que este cálculo está sujeito, com base nas temperaturas da tabela D.5 presente no Anexo D da EN 1994-1-2 D.3, na parte relativa ao cálculo do momento resistente negativo, e nas equações de cálculo da

altura efectiva da laje presentes em D.4, é possível estimar as temperaturas no betão. Esta altura efectiva  $h_{eff}$  corresponde a uma espessura de laje com secção transversal rectangular, como se mostra na figura 3.4.

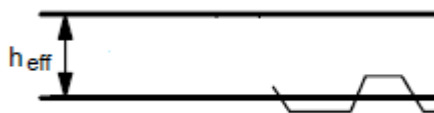


Figura 3.4 – Indicação da altura efectiva da laje,  $h_{eff}$ .

Sendo  $h_{eff}$  calculado pelas seguintes equações:

$$h_{eff} = h_1 + 0.5h_2 \frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \quad \text{para } h_2/h_1 \leq 1.5 \text{ e } h_1 > 40\text{mm} \quad (12a)$$

$$h_{eff} = h_1 \left[ 1 + 0.75 \frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right] \quad \text{para } h_2/h_1 \leq 1.5 \text{ e } h_1 > 40\text{mm} \quad (12b)$$

Em que:

$h_1$ ,  $h_2$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$  – parâmetros geométricos expressos em mm, ver figura 3.3.

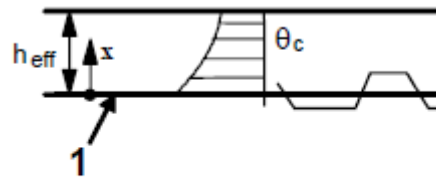
Nota: caso se verifique  $l_3 > 2l_1$ ,  $h_{eff}$  toma o valor de  $h_1$ .

Após o cálculo da altura efectiva, do quadro 3.7 é possível estimar-se as temperaturas do betão após 30, 60, 90, 120, 180 ou 240 minutos em qualquer ponto da laje.

Quadro 3.7 – Evolução das temperaturas numa laje maciça com espessura de 100 mm, em betão normal sem isolamento (EN 1994-1-2, Anexo D).

Profundidade x (mm)	Temperatura no betão $\Theta_c$ [°C] após um incêndio de duração:					
	30'	60'	90'	120'	180'	240'
5	535	705				
10	470	642	738			
15	415	581	681	754		
20	350	525	627	697		
25	300	469	571	642	738	
30	250	421	519	591	689	740
35	210	374	473	542	635	700
40	180	327	428	493	590	670
45	160	289	387	454	549	645
50	140	250	345	415	508	550
55	125	200	294	369	469	520
60	110	175	271	342	430	495
80	80	140	220	270	330	395
100	60	100	160	210	260	305

Para todos os casos, a evolução das temperaturas no betão segue o diagrama apresentado na figura 3.5.



**1 - Face aquecida**

Figura 3.5 – Diagrama da evolução das temperaturas no betão ao longo da altura efectiva da laje (EN 1994-1-2 Anexo D Tabela D.5).

### 3.3.3 Evolução das temperaturas com o tempo para o cálculo do momento resistente negativo

Neste caso, o único material no qual interessa estimar a evolução das temperaturas é o betão. No Anexo D da EN 1994-1-2 D.3 (1), é sugerido que não se considere a contribuição da chapa metálica para a resistência do conjunto. Da mesma forma, a não ser que a laje esteja provida de armadura de distribuição superior, que apenas se verifica nos casos de lajes contínuas, os varões longitudinais introduzidos nas nervuras também não contribuem para a resistência, por estarmos na zona de compressão.

As cláusulas D.3 (2) e (3) do Anexo D da EN 1994-1-2 propõem que se considere uma secção de betão reduzida, onde as temperaturas não excedem um determinado limite imposto,  $\Theta_{lim}$ , calculado pela equação (13). O  $\Theta_{lim}$  será considerado como o valor da temperatura no betão, considerando assim, a situação mais desfavorável.

$$\Theta_{lim} = d_0 + d_1.N_s + d_2.(A/L_r) + d_3.\Phi + d_4.(l/l_3) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

Em que:

$d_0, d_1, d_2, d_3$  e  $d_4$  – factores retirados do quadro 3.9;

$N_s$  – força normal nos varões longitudinais do momento negativo, em N;

$A/L_r$  – factor geométrico da nervura em mm, ver equação (8);

$\Phi$  – ver equação (9);

$l_3$  – largura do banzo superior da chapa em mm, ver figura 3.2.



Os factores  $d_i$ , para betão normal, seguem no quadro 3.8:

Quadro 3.8 – Coeficientes para a determinação da temperatura limite  $\Theta_{lim}$ .

Resistência ao fogo		$d_0$ [°C]	$d_1$ [°C].N	$d_2$ [°C].mm	$d_3$ [°C]	$d_4$ [°C].mm
30	<b>Banzo inferior</b>	679	-0.00013	-7.59	-91.99	-766
60		867	-0.00019	-8.75	-123	-1378
90		1055	-0.00022	-9.91	-154	-1990
120		1144	-0.00022	-9.71	-166	-2155
180		1619	-0.00028	-13.40	-247	-3826

Os restantes factores da equação (13) já foram apresentados anteriormente no subcapítulo 3.3.1.

A área considerada, que resiste efectivamente aos esforços para a qual é solicitada, é estabelecida com base na curva isotérmica correspondente à temperatura limite. Esta curva é obtida a partir de quatro pontos distintos: I, II, III e IV. Na figura 3.6 apresenta-se um esquema da isotérmica a definir (EN 1994-1-2 D.3 (3)).

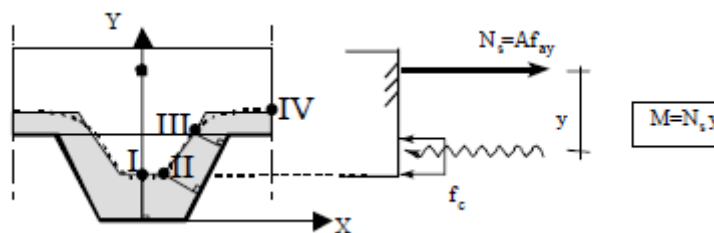


Figura 3.6 – Definição da isotérmica correspondente a  $\Theta_{lim}$  (EN 1994-1-2, Anexo D).

As coordenadas dos pontos I, II, III e IV são determinadas com o auxílio das seguintes equações:

$$X_I = 0 \quad (14)$$

$$Y_I = Y_{II} = \frac{1}{\left(\frac{1}{z} - \frac{4}{\sqrt{l_1 + l_3}}\right)^2} \quad (15)$$

$$X_{II} = \frac{1}{2}l_2 + \frac{Y_I}{\text{sen}\alpha} \cos(\alpha - 1) \quad (16)$$

$$X_{II} = \frac{1}{2}l_1 - \frac{b}{\text{sen}\alpha} \quad (17)$$

$$Y_{III} = h_2 \quad (18)$$

$$X_{IV} = \frac{1}{2}l_1 + \frac{1}{2}l_3 \quad (19)$$

Com:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2h_2}{l_1 - l_2}\right) \quad a = \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{\sqrt{h_2}}\right)^2 l_1 \text{sen}\alpha \quad b = \frac{1}{2}l_1 \text{sen}\alpha \left(1 - \frac{\sqrt{a^2 - 4a + c}}{a}\right)$$

$$c = -8(1 + \sqrt{1+a}); a \geq 8 \quad c = +8(1 + \sqrt{1+a}); a \leq 8$$

O factor  $z$  deve ser determinado através da equação (10), substituindo  $u_3/h_2$  por 0.75 e  $\Theta_s$  por  $\Theta_{lim}$ .

### 3.4 Propriedades dos materiais a elevadas temperaturas

#### 3.4.1 Introdução

A presença de uma fonte de calor, como um incêndio, pode introduzir efeitos à estrutura tais como:

- variações das propriedades mecânicas do aço e do betão;
- tensões induzidas pela variação de temperatura entre elementos.

De seguida explicam-se as variações das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais que compõem as estruturas mistas.

#### 3.4.2 Aço

Para taxas de aquecimento que variam entre os 2 K/min e os 50 K/min, as propriedades mecânicas do aço estrutural sujeito a elevadas temperaturas devem ser obtidas pela curva tensão-deformação (ver figura 3.7 e quadro 3.9), apresentada na EN 1994-1-2 cláusula 3.2.1(2).

As relações tensão-extensão apresentadas na figura 3.7 e quadro 3.9 são caracterizadas por três parâmetros distintos:

- a inclinação da zona linear elástica  $E_{a,\theta}$ ;
- o limite proporcional  $f_{ap,\theta}$ ;
- o nível máximo de tensão  $f_{ay,\theta}$ .

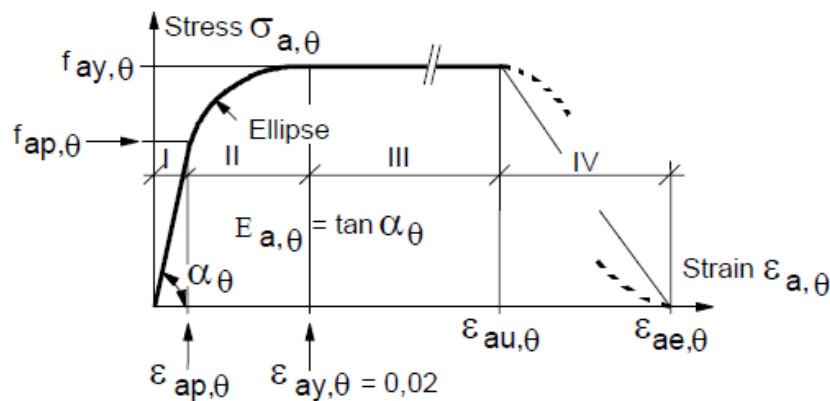


Figura 3.7 – Curva relação tensão-extensão do aço estrutural a elevadas temperaturas.

Quadro 3.9 – Relação entre os parâmetros presentes na curva da figura 3.7.

Strain Range	Stress $\sigma$	Tangent modulus
I / elastic $\epsilon \leq \epsilon_{ap,\theta}$	$E_{a,\theta} \epsilon_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
II / transit elliptical $\epsilon_{ap,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{ay,\theta}$	$(f_{ap,\theta} - c) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{a,\theta})^2}$ with $a^2 = (\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{ap,\theta})(\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{ap,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = E_{a,\theta} (\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{ap,\theta})c + c^2$ $c = \frac{(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{E_{a,\theta}(\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{a,\theta})}{a \sqrt{a^2 - (\epsilon_{ay,\theta} - \epsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plastic $\epsilon_{ay,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0

Para a obtenção destes parâmetros a uma determinada temperatura  $\Theta_a$ , a EN 1994-1-2 cláusula 3.2.1(7) fornece factores de redução  $k_\theta$  das propriedades mecânicas, apresentados de seguida no quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Factores de redução  $k_{\theta}$  para o aço estrutural a elevadas temperaturas.

Steel Temperature $\theta_a$ [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ap}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,420	1,00	1,25
500	0,60	0,360	0,78	1,25
600	0,31	0,180	0,47	1,25
700	0,13	0,075	0,23	1,25
800	0,09	0,050	0,11	1,25
900	0,0675	0,0375	0,06	1,25
1000	0,0450	0,0250	0,04	1,25
1100	0,0225	0,0125	0,02	1,25
1200	0	0	0	1,25

Para as propriedades mecânicas do aço de armaduras, a relação tensão-deformação e os respectivos parâmetros que a definem mantêm-se, sendo que variam apenas os factores de redução  $k_{\theta}$ , dados no quadro 3.11 retirado da EN 1994-1-2 cláusula 3.2.3(4).

Quadro 3.11 – Factores de redução  $k_{\theta}$  para o aço de reforço a elevadas temperaturas.

Steel Temperature $\theta_s$ [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{sp,\theta}}{f_{sp}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{sy,\theta}}{f_{sy}}$
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	0,96	1,00
200	0,87	0,92	1,00
300	0,72	0,81	1,00
400	0,56	0,63	0,94
500	0,40	0,44	0,67
600	0,24	0,26	0,40
700	0,08	0,08	0,12
800	0,06	0,06	0,11
900	0,05	0,05	0,08
1000	0,03	0,03	0,05
1100	0,02	0,02	0,03
1200	0	0	0

As propriedades térmicas do aço estrutural e de armaduras, variam de igual forma consoante o aumento de temperatura. Para a aplicação do Método de Cálculo Simplificado, a EN 1994-1-2 cláusula 3.3.1 apresenta as equações para o cálculo de três variáveis: a variação de comprimento  $\Delta l/l$ , o calor específico  $c_a$  e a condutividade térmica  $\lambda_a$ .

Variação de comprimento  $\Delta l/l$ :

- $\Delta l/l = -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} \times \Theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \times \Theta_a^2$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 750^\circ\text{C}$
- $\Delta l/l = 11 \times 10^{-3}$  para  $750^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 860^\circ\text{C}$
- $\Delta l/l = -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \times \Theta_a$  para  $860^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

- $\Delta l/l = 14 \times 10^{-6} \times (\Theta_a - 20)$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.8 a).

Variação do calor específico  $c_a$  em [J/kgK]:

- $c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \times \Theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \times \Theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \times \Theta_a^3$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 600^\circ\text{C}$
- $c_a = 666 - (13002 / (\Theta_a - 738))$  para  $600^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 735^\circ\text{C}$
- $c_a = 545 + (17820 / (\Theta_a - 731))$  para  $735^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 900^\circ\text{C}$
- $c_a = 650$  para  $900^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

- $c_a = 600$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.8 b).

Variação da condutividade térmica  $\lambda_a$  em [W/mK]:

- $\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \times \Theta_a$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 800^\circ\text{C}$
- $\lambda_a = 27.3$  para  $800^\circ\text{C} < \Theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

- $\lambda_a = 45$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.8 c).

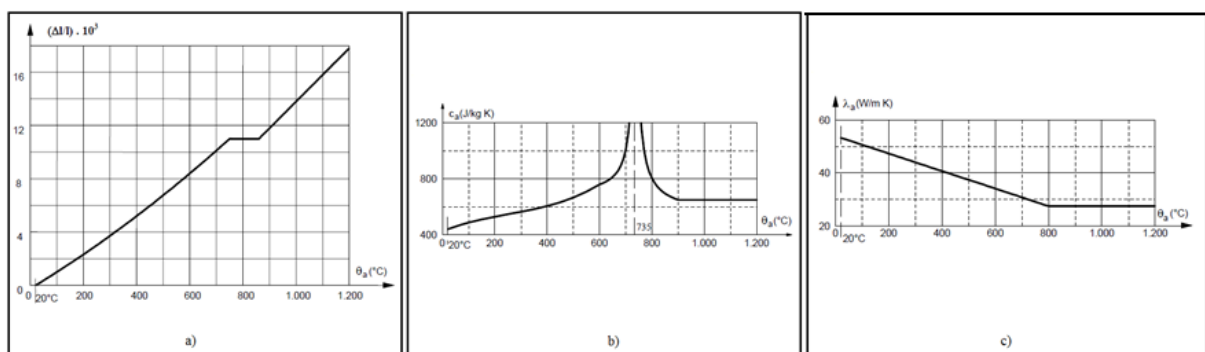


Figura 3.8 – a) Variação de comprimento  $\Delta l/l$  do aço em função da variação da temperatura; b) Variação do calor específico  $c_a$  do aço em função da variação da temperatura; c) Variação da condutividade térmica  $\lambda_a$  do aço em função da variação da temperatura (EN 1994-1-2 cláusula 3.3.1).

### 3.4.3 Betão

Analogamente ao aço estrutural, para taxas de aquecimento entre os 2 K/min e os 50 K/min, as propriedades mecânicas do betão normal comprimido sujeito a elevadas temperaturas são obtidas pela curva tensão-deformação (ver figura 3.9) retirada da EN 1994-1-2 cláusula 3.2.2(10).

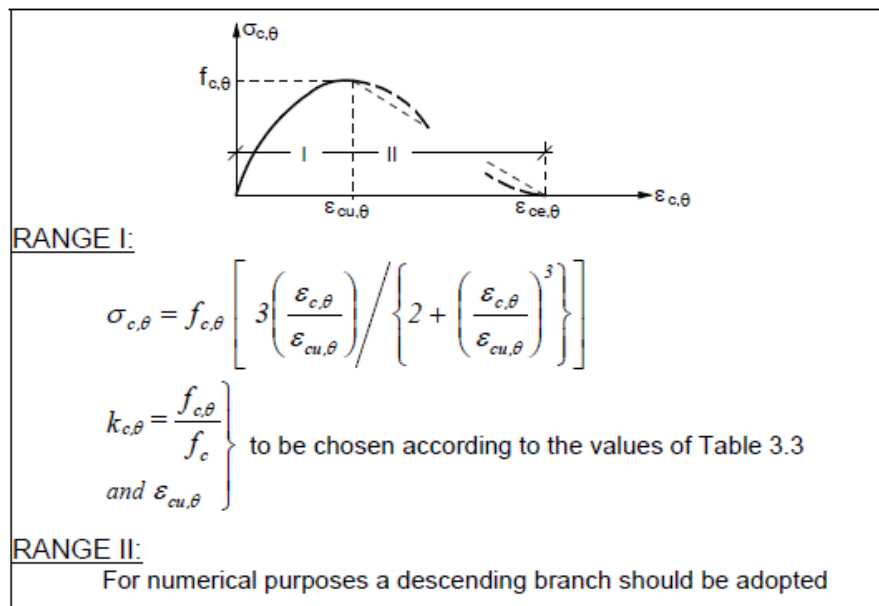


Figura 3.9 – Curva relação tensão-extensão do betão normal à compressão a elevadas temperaturas.

A relação tensão-deformação apresentada na figura 3.9, é definida por dois parâmetros:

- a tensão de compressão  $f_{c,\theta}$ ;
- a extensão  $\varepsilon_{cu,\theta}$  correspondente a  $f_{c,\theta}$ .

Na mesma cláusula mencionada acima, é fornecido um quadro com os factores de redução  $k_{c,\theta}$  a aplicar a  $f_c$  e  $\varepsilon_{cu}$  de modo a obter  $f_{c,\theta}$  e  $\varepsilon_{cu,\theta}$  (ver quadro 3.12).

Quadro 3.12 – Factores de redução  $k_{\theta}$  para o betão a elevadas temperaturas.

Concrete Temperature $\theta_c$ [°C]	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$ NC
	NC	LC	
20	1	1	2,5
100	1	1	4,0
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-

As propriedades térmicas do betão normal dependem igualmente da variação de temperatura. Assim, apresentam-se de seguida as equações, presentes na EN 1994-1-2 cláusula 3.3.2, que permitem o cálculo da variação de comprimento  $\Delta l/l$ , do calor específico  $c_c$  e da condutividade térmica  $\lambda_c$ .

Variação de comprimento  $\Delta l/l$ :

- $\Delta l/l = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \times \Theta_c + 2.3 \times 10^{-11} \times \Theta_c^3$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 700^\circ\text{C}$
- $\Delta l/l = 14 \times 10^{-3}$  para  $700^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$
- $\Delta l/l = 18 \times 10^{-6} \times (\Theta_c - 20)$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.10 a).

Variação do calor específico  $c_c$  em [J/kgK]:

- $c_c = 900$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 100^\circ\text{C}$
- $c_c = 900 + (\Theta_c - 100)$  para  $100^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 200^\circ\text{C}$
- $c_c = 1000 + (\Theta_c - 200)/2$  para  $200^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 400^\circ\text{C}$
- $c_c = 1100$  para  $400^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$
- $c_c = 1000$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.10 b).

Variação da condutividade térmica  $\lambda_c$  em [W/mK], entre o limite máximo e o mínimo, respectivamente:

- $\lambda_{c \max} = 2 - 0.2451 \times (\Theta_c/100) + 0.0107 \times (\Theta_c/100)^2$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$
- $\lambda_{c \min} = 1.36 - 0.136 \times (\Theta_c/100) + 0.0057 \times (\Theta_c/100)^2$  para  $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$
  
- $\lambda_c = 1.60$  para o método de cálculo simplificado

Esta variação pode ser ilustrada em forma de gráfico, apresentado na figura 3.10 c).

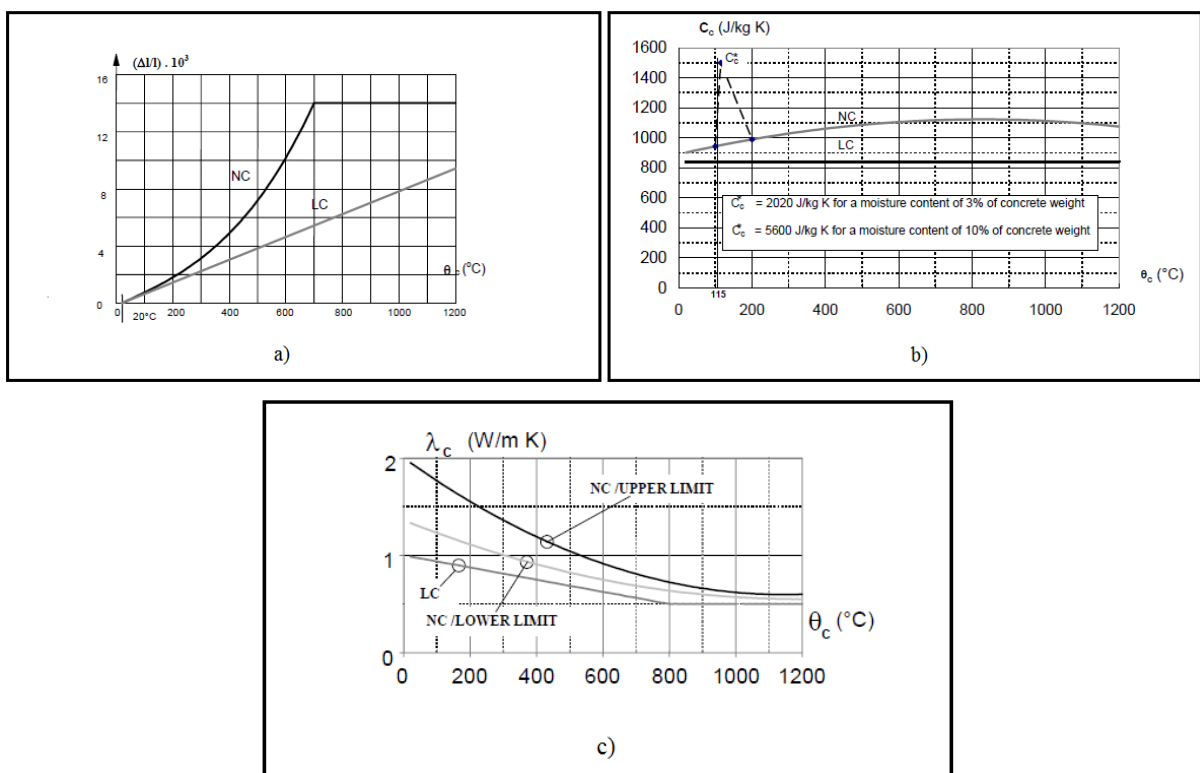


Figura 3.10 – a) Variação de comprimento  $\Delta l/l$  do betão em função da variação da temperatura; b) Variação do calor específico  $c_c$  do betão em função da variação da temperatura; c) Variação da condutividade térmica  $\lambda_c$  do betão em função da variação da temperatura (EN 1994-1-2 cláusula 3.3.2).

### 3.5 Análise do comportamento estrutural e verificações

#### 3.5.1 Introdução

Apesar da verificação estrutural ao fogo poder ser feita por três vias diferentes: análise por elementos, análise de partes da estrutura ou análise global, a verificação aqui efectuada com



base na curva ISO 834, será efectuada com uma análise por elementos. Adicionalmente, a EN 1991-1-2 sugere que as verificações sejam feitas segundo um dos três seguintes domínios: domínio do tempo ( $t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$ ); domínio da resistência ( $E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$ ) e domínio da temperatura ( $\theta_d \leq \theta_{cr,d}$ ). O domínio aqui escolhido para efectuar as verificações foi o domínio da resistência.

No projecto de lajes mistas expostas ao fogo, a EN 1994-1-2 apenas sugere a verificação do estado limite último de flexão para garantirmos a sua segurança no domínio da resistência. No entanto, com o objectivo de tornar esta análise mais completa, considera-se não só o modo de rotura à flexão mas também ao corte vertical e longitudinal, tal como considerado à temperatura ambiente. Como a parte relativa ao fogo da EN 1994 apenas contempla a flexão, a verificação ao corte longitudinal e vertical é feita com base nas equações fornecidas pela EN 1994-1-1 cláusulas 9.7.3, 9.7.4 e 9.7.5, adaptando-as ao fogo alterando as propriedades dos materiais.

### 3.5.2 Verificação ao estado limite último de flexão

Neste subcapítulo pretende-se provar a estabilidade do elemento à flexão durante a sua exposição a elevadas temperaturas, causadas por um incêndio. A relação a verificar traduz-se por:

$$M_{fi,Ed} \leq M_{fi,Rd} \quad (21)$$

Em que:

$M_{fi,Ed}$  – valor de cálculo do momento flector máximo actuante em situação de incêndio;

$M_{fi,Rd}$  – valor de cálculo do momento flector resistente em conexão total em situação de incêndio.

Naturalmente, falando de lajes contínuas de dois ou mais tramos, as verificações deverão ser efectuadas para ambas as situações de esforços negativos e positivos.

#### 3.5.2.1 Cálculo do momento flector resistente positivo $M_{fi,Rd}^+$

O momento flector resistente é determinado com base nas equações da EN 1994-1-2 cláusula 4.3, relativa ao método de cálculo simplificado. Para ambos os momentos flectores resistentes positivos e negativos, a equação utilizada é a seguinte:

$$M_{fi,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \left( \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j z_j k_{c,\theta,i} \left( \frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (22)$$

Em que:

$A_i$  e  $A_j$  – áreas elementares de aço e betão, respectivamente;

$f_{y,i}$  e  $f_{c,j}$  – tensão de cedência nominal no aço e betão, respectivamente;

$k_{y,\theta,i}$  e  $k_{c,\theta,j}$  – coeficientes de redução do aço e betão, respectivamente, retirados dos quadros 3.11, 3.12 e 3.13;

$z_i$  e  $z_j$  – distância ao eixo neutro plástico do centro geométrico das áreas elementares  $A_i$  e  $A_j$ ;

$\alpha_{slab}$  – coeficiente tomado igual a 0.85 que tem em conta o diagrama de tensões rectangulares no cálculo das lajes.

Por sua vez, a posição do eixo neutro plástico, necessária para o cálculo de  $z_i$  e  $z_j$ , é determinada pela equação abaixo:

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} \left( \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} \right) + \alpha_{slab} \sum_{j=1}^m A_j k_{c,\theta,j} \left( \frac{f_{c,j}}{\gamma_{M,fi,c}} \right) \quad (23)$$

Para efectuar e simplificar este cálculo, optou-se por considerar o betão todo à mesma temperatura, considerando uma única faixa de betão (ver figura 3.11), de altura coincidente com a profundidade do eixo neutro plástico,  $x$ . Esta aproximação foi tida em conta considerando que o betão a resistir efectivamente se encontra muito próximo do topo da laje, onde a temperatura atingida não é muito significativa. Desta forma, a equação (23) pode ser simplificada de acordo com o seguinte:

$$x = \frac{A_{chapa} f_{ya} + A_{varões} f_{ys}}{0.85 f_{cd} b} \quad (24)$$

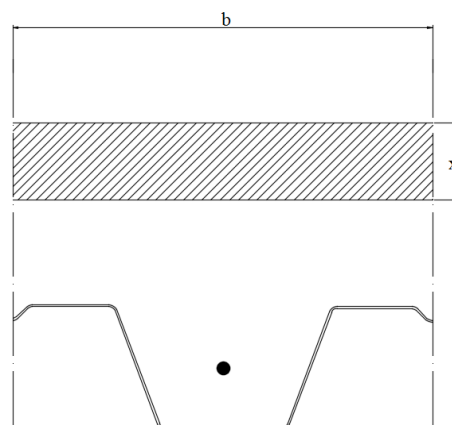


Figura 3.11 – Faixa de betão à compressão a considerar para o cálculo de  $M_{fi,Rd}^+$ .

Adicionalmente, e somente para  $M_{fi,Rd}^+$ , as áreas e distâncias  $z$  relativas aos varões (caso sejam introduzidos nas nervuras) e à chapa metálica entram no cálculo do momento flector e

da posição do eixo neutro. Após a determinação de todos os parâmetros essenciais para o cálculo de  $M_{fi,Rd}^+$ , este valor poderá ser obtido para a resistência ao fogo pretendida (exemplo:  $M_{fi,Rd}^+$  para R30, R60, etc.).

### 3.5.2.2 Cálculo do momento flector resistente negativo $M_{fi,Rd}^-$

O cálculo de  $M_{fi,Rd}^-$  é em tudo semelhante ao cálculo efectuado para  $M_{fi,Rd}^+$ . As principais diferenças são: consideração de uma área de betão reduzida, com temperaturas abaixo do limite pré-estabelecido  $\Theta_{lim}$ ; não consideração da resistência oferecida pela chapa e pelos varões longitudinais colocados nas nervuras. Esta aproximação além de conservadora, permite uma redução do volume de cálculos a efectuar. Da mesma forma, o valor de  $M_{fi,Rd}^-$  pode ser determinado consoante a resistência ao fogo pretendida, bastando para isso, alterar os factores de redução  $k_\theta$  dos materiais. De acordo com a figura 3.12, a área de betão a resistir encontra-se na nervura, excepto o betão que se encontra a uma temperatura acima de  $\Theta_{lim}$ . Quando considerada, a armadura de reforço em tracção adoptada é igual a  $\phi 10 // 0.15$  m.

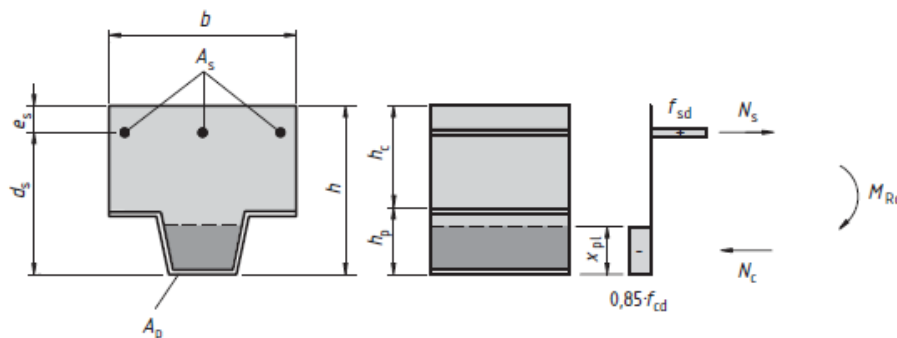


Figura 3.12 – Cálculo do momento resistente negativo.

Em que:

$M_{pa}$  – momento flector resistente plástico da chapa perfilada em kNm/m;

$N_c$  – força de compressão na laje de betão em kN/m;

$N_{cf}$  – valor mínimo entre a resistência à compressão da laje de betão com espessura  $h_c$  e a resistência à tracção da chapa metálica em kN/m;

$A_{pe}$  – área da chapa metálica com espessura  $t=t_{real}-e_{efectiva}$  em  $cm^2/m$ ;

$f_{yp,d}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço da chapa metálica em MPa;

$\tau_{u,Rd}$  – valor de cálculo da tensão última resistente ao corte longitudinal na interface aço-betão;

$b$  – largura da secção transversal em mm;

$L_x$  – distância entre secção transversal considerada e o apoio mais próximo em mm;

$e$  – posição do eixo neutro elástico em mm;

$e_p$  – posição do eixo neutro plástico em mm;

$x_{pl}$  – altura da lâmina de betão à compressão em mm.

### 3.5.3 Verificação ao estado limite último de corte vertical

A verificação ao corte vertical será feita com base na formulação apresentada na EN 1992-1-1, cláusula 6.2.2. A relação a verificar segue abaixo:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (24)$$

Em que:

$V_{Ed}$  – valor de cálculo do esforço transversal máximo actuante;

$V_{Rd,c}$  – valor de cálculo do esforço transversal resistente.

O valor de cálculo do esforço transversal resistente é obtido por:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad [N] \quad (25)$$

Com:  $v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$

Em que:

$f_{ck}$  – em MPa;

$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0$  com  $d$  em mm;

$\rho_l = (A_{sl}/b_w d) \leq 0.02$ ;

$A_{sl}$  – área do reforço à tracção;

$b_w$  – menor largura da secção transversal à tracção em mm;

$\sigma_{cp} = (N_{Ed}/A_c) < 0.2 f_{cd}$  em MPa;

$N_{Ed}$  – força axial na secção transversal causada pela carga ou aplicação de pré-esforço, em  $N$  ( $N_{Ed} > 0$  para compressão). A influência de deformações impostas em  $N_E$  deve ser ignorada;

$A_c$  – área da secção transversal de betão em  $\text{mm}^2$ ;

$C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ ;

$k_1 = 0.15$ .

Adicionalmente, com o intuito de aumentar a resistência ao corte vertical, que como se verificará no subcapítulo 4.1 pode ser bastante limitativo e condicionante, ao valor de cálculo do esforço transversal resistente  $V_{Rd,c}$  somou-se o valor da resistência ao esforço transversal da secção efectiva da chapa. Para o perfil H60, estes valores encontram-se descritos em tabelas de fabricantes. Já para o caso do perfil H120, por se tratar de uma chapa em desenvolvimento, estes valores foram calculados tendo em conta o estipulado na EN 1993-1-3, cláusula 6.1.5. A resistência de cálculo da chapa deve ser calculada de acordo com a equação (26):

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin\phi} t f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad (26)$$

Em que:

$h_w$  – altura da alma (ver figura 3.13);

$\phi$  – ângulo de inclinação da alma com a horizontal (ver figura 3.13);

$t$  – espessura efectiva da chapa, em mm ( $t_{real}-0.04$ );

$f_{bv}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço da chapa metálica em MPa de acordo com as condições apresentadas no quadro 3.14;

$\gamma_{M0}$  – coeficiente de segurança de valor igual a 1.

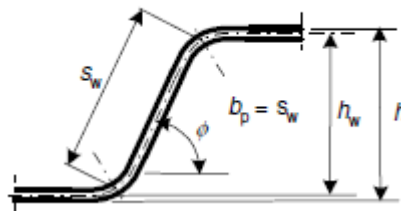


Figura 3.13 – Parâmetros geométricos da chapa (EN 1993-1-3, cláusula 5.1.(3)).

Quadro 3.13 – Cálculo de  $f_{bv}$ .

Relative web slenderness	Web without stiffening at the support	Web with stiffening at the support 1)
$\bar{\lambda}_w \leq 0.83$	$0.58 f_{yb}$	$0.58 f_{yb}$
$0.83 < \bar{\lambda}_w < 1.40$	$0.48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0.48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1.40$	$0.67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0.48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

1) Stiffening at the support, such as cleats, arranged to prevent distortion of the web and designed to resist the support reaction.

Em que:

$$\bar{\lambda}_w = 0.346 \frac{S_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (27)$$

Note-se que a metodologia de cálculo adoptada, referida no parágrafo anterior constitui ainda uma hipótese a confirmar em estudos futuros a desenvolver no âmbito do projecto *INOV-LAMI*.

### 3.5.4 Verificação ao estado limite último de corte longitudinal

#### 3.5.4.1 Introdução

Este modo de rotura ocorre quando a força de corte longitudinal excede a força resistente ao corte longitudinal, entre o betão e a chapa metálica. A resistência ao corte longitudinal é calculada por dois métodos apresentados na EN 1994-1-1, método de  $m-k$  e método da conexão parcial. Em ambos assume-se que os parâmetros de escorregamento ( $m$ ,  $k$  ou  $\tau_{u,Rd}$ ) ao fogo se mantêm iguais aos da temperatura ambiente, pois não foram encontrados estudos que comprovem o contrário. Nesta norma estão previstos dois casos que diferem no modo como esta resistência é calculada: corte longitudinal em lajes mistas sem amarração de extremidade e corte longitudinal em lajes mistas com amarração de extremidade.

#### 3.5.4.2 Cálculo da resistência ao corte longitudinal em lajes sem ancoragem de extremidade

As disposições que se apresentam de seguida, aplicam-se a lajes mistas com as configurações de interligação mecânica indicadas na figura 3.14 retirada da EN 1994-1-1, 9.1.2.1.

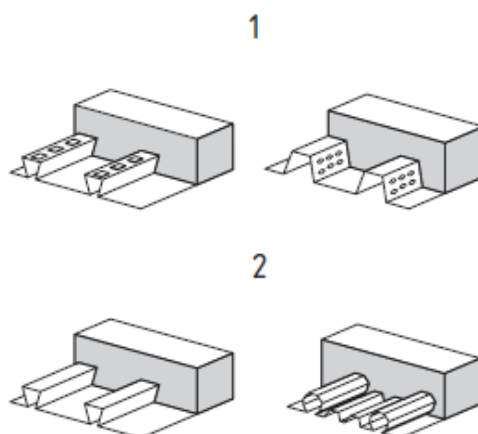


Figura 3.14 – Principais configurações de lajes mistas sem ancoragem de extremidade.

Para esta situação de lajes mistas sem ancoragem de extremidade, a resistência ao corte longitudinal pode ser obtida pelo método de  $m-k$  ou através do método da conexão parcial. Este último método, mais conservativo, permite a adoção de ancoragem de extremidade e surge como uma alternativa aplicada a lajes mistas com chapas colaborantes de comportamento dúctil. Entende-se por comportamento dúctil quando a carga de rotura excede em 10 % a carga que causa um deslocamento na extremidade de 0.1mm.

### Método de $m-k$ :

Para verificar a segurança, a relação que deve ser respeitada é traduzida pela seguinte condição:

$$V_{Ed} \leq V_{l,Rd} \quad (28)$$

Em que:

$V_{Ed}$  – valor de cálculo do esforço transversal máximo actuante;

$V_{Rd,c}$  – valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal.

O valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal pode ser determinado pela seguinte equação:

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_p}{\gamma_{vs}} \left( \frac{mA_p}{bL_s} + k \right) \quad (29)$$

Em que:

$b, d_p$  – largura e altura média da laje em mm;

$A_p$  – área da chapa em mm<sup>2</sup>;

$m, k$  – parâmetros característicos da chapa metálica fornecidos pelo fabricante em N/mm<sup>2</sup>;

$L_s$  – vão de corte em mm;

$\gamma_{vs}$  – coeficiente parcial de segurança, igual a 1.25.

Para lajes mistas simplesmente apoiadas com uma carga actuante uniformemente distribuída, o vão de corte é dado por  $L/4$ . No caso de lajes mistas contínuas,  $L_s$  é tomado como  $0.8L$  para vãos intermédios e igual a  $0.9L$  para vãos de extremidade.

### Método de conexão parcial:

O método da conexão parcial tem em conta o valor de cálculo da tensão última resistente ao corte,  $\tau_{u,Rd}$ . Neste caso, a relação a verificar para garantir a segurança passa por demonstrar o seguinte:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (30)$$

Em que:

$M_{Ed}$  – valor de cálculo do momento flector máximo actuante;

$M_{Rd}$  – valor de cálculo do momento flector resistente.

Como se pode verificar observando a figura 3.12, presente na EN 1994-1-1 cláusula 9.7.2 (7), o valor de  $M_{Rd}$  é obtido por:

$$M_{Rd} = N_c z + M_{pr} \quad (31)$$

Onde:

$$M_{pr} = 1.25 M_{pa} \left( 1 - \frac{N_c}{A_{pe} f_{yp,d}} \right) \leq M_{pa} \quad (32)$$

$$N_c = \tau_{u,Rd} b L_x \leq N_{cf} \quad (33)$$

$L_x$  – Distância entre a secção transversal considerada e o apoio mais próximo.

$$z = h - 0.5 x_{pl} - e_p + (e_p - e) \frac{N_c}{A_{pe} f_{yp,d}} \quad (34)$$

Caso se verifique a existência de varões longitudinais de reforço nas nervuras, a resistência destes devem ser tidos em conta no cálculo do momento flector resistente da seguinte forma:

$$M_{Rd} = N_c z + M_{pr} + N_{as} z_1 \quad (35)$$

Onde:

$$N_{as} = A_s f_{yd} \quad (36)$$

$$z_1 = d_s 0.5 x_{pl} \quad (37)$$

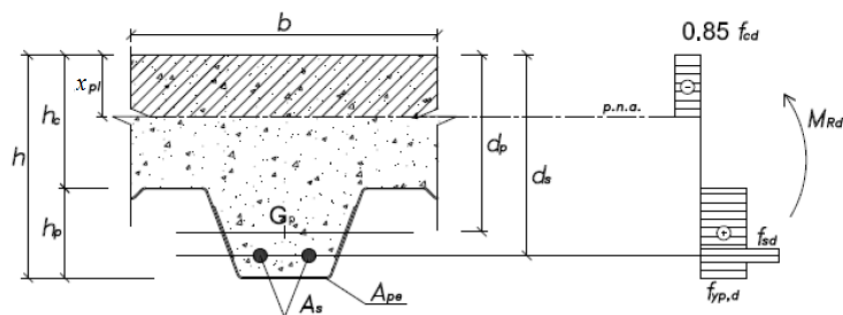


Figura 3.15 – Cálculo do momento resistente positivo numa secção com reforço longitudinal.

Em que:

$N_{as}$  – força de tracção nos varões longitudinais, em kN/m;

$A_s$  – área dos varões longitudinais, em cm<sup>2</sup>/m;

$f_{yd}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço dos varões, em MPa;



$z_1$  – distância do ponto de aplicação de  $N_c$  ao centro geométrico dos varões longitudinais, em mm;

$d_s$  – distância do topo da laje ao centro geométrico dos varões longitudinais, em mm.

### 3.5.4.3 Cálculo da resistência ao corte longitudinal em lajes com ancoragem de extremidade

Para o caso em que as lajes mistas dispõem de ancoragem de extremidade, as disposições que se apresentam abaixo aplicam-se a configurações de interligação mecânica apresentadas na figura 3.16.

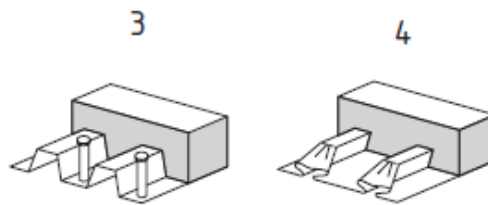


Figura 3.16 – Principais configurações de lajes mistas com ancoragem de extremidade  
(EN 1994-1-1, 9.1.2.1).

Existem ainda, outras configurações de ancoragem de extremidade que, embora não contempladas pela EN 1994-1-1, encontram-se em desenvolvimento no projecto *INOV-LAMI*. Refere-se como exemplo, a introdução de um varão transversal através das nervuras.

#### Método de conexão parcial:

Nesta situação, a verificação a efectuar e os cálculos para determinar  $M_{Rd}$  são iguais ao caso de lajes mistas sem ancoragem, excepto o parâmetro  $N_c$  que deve ser incrementado em  $P_{pb,Rd}$ . A resistência de um perno de cabeça soldado a uma chapa metálica é determinada da seguinte forma:

$$P_{pb,Rd} = k_{\phi} d_{do} t f_{yp,d} \quad (38)$$

Com:

$$k_{\phi} = 1 + a/d_{do} \leq 6.0 \quad (39)$$

Em que :

$d_{do}$  – diâmetro do anel de soldadura que pode ser considerado como 1,1 vezes o diâmetro da espiga do perno em mm;

$f_{yp,d}$  – valor de cálculo da tensão de cedência do aço da chapa metálica em MPa;

$a$  – distância entre o eixo do perno e a extremidade da chapa, não inferior a  $1.5d_{do}$  em mm;

$t$  – espessura da chapa metálica em mm.

## 4 APLICAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE TABELAS DE CÁLCULO

### 4.1 Introdução

Com base na metodologia anteriormente apresentada, para um exemplo de laje mista não-protégida de um e dois tramos com 4 metros de vão, com chapa H60 de 1.0mm de espessura e altura total de 150mm, pretende-se verificar a cláusula 4.3.2 (5) da EN 1994-1-2 e os modos de rotura condicionantes: flexão, corte longitudinal e corte vertical.

### 4.2 Caso de estudo 1: exemplo de cálculo de lajes mistas de 1 tramo

As características relevantes deste caso de estudo encontram-se sumariadas no quadro 4.1, abaixo apresentado:

Quadro 4.1 – Caso de estudo 1.

<b>Características - caso de estudo 1:</b>		
nº tramos	1	
Condições Apoio	simplesmente apoiada	
Vão	4	m
Utilização tipo	escritórios	
Sobrecarga	3	kN/m <sup>2</sup>
Tipos de chapa	H60	H120
Espessura	1	mm
Reforço adicional	ϕ10 ou ϕ12	
Curva de incêndio	ISO 834	

As propriedades dos materiais utilizados (chapa metálica e betão) estão resumidas no quadro 4.2 bem como as respectivas propriedades geométricas, nos quadros 4.3 e 4.4. Os parâmetros  $m$  e  $k$  encontram-se no quadro 4.5 e as características das classes do betão, no quadro 4.6.

Quadro 4.2 – Propriedades do aço da chapa metálica.

<b>Propriedades do aço (chapa metálica):</b>		
Tensão de cedência - $f_{yb}$	320	N/mm <sup>2</sup>
Tensão de rotura - $f_u$	390	N/mm <sup>2</sup>
Alongamento após rotura - $\delta$	17	%

Quadro 4.3 – Propriedades da secção bruta da chapa metálica.

<b>Características - perfil H60 (secção bruta):</b>						
<b>Espessura da chapa (mm)</b>	<b>Peso próprio (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>A<sub>nominal</sub> (cm<sup>2</sup>/m)</b>	<b>A<sub>pe</sub> (cm<sup>2</sup>/m)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>y<sub>g</sub> (mm)</b>	<b>I<sub>p</sub> (cm<sup>4</sup>/m)</b>
0.7	0.078	9.90	9.17	60	34	56.10
0.8	0.089	11.37	10.59	60	34	64.59
1.0	0.111	14.20	13.34	60	34	81.61
1.2	0.134	17.02	16.15	60	34	98.59

Quadro 4.4 – Propriedades da secção efectiva da chapa metálica.

<b>Características - perfil H60 (secção efectiva em flexão positiva):</b>							
<b>Espessura da chapa (mm)</b>	<b>A<sub>ef</sub> (cm<sup>2</sup>/m)</b>	<b>y<sub>g,ef</sub> (mm)</b>	<b>V<sub>Rd,ef</sub> (kN/m)</b>	<b>I<sub>ef</sub> (cm<sup>4</sup>/m)</b>	<b>W<sub>el,ef</sub> (cm<sup>3</sup>/m)</b>	<b>M<sub>Rd,ef</sub> (kN.m/m)</b>	<b>EI<sub>ef</sub> (kN.m<sup>2</sup>/m)</b>
0.7	7.82	29.8	48.09	45.98	15.2	4.9	96.56
0.8	9.07	30.0	63.77	53.49	17.8	5.7	112.33
1.0	11.59	30.3	101.75	68.60	22.6	7.2	144.06
1.2	14.12	30.6	132.18	83.84	27.4	8.8	176.06

Quadro 4.5 – Parâmetros de corte longitudinal da chapa, *m* e *k*.

<b>Parâmetros de corte longitudinal da chapa:</b>		
<i>m</i>	98.32	N/mm <sup>2</sup>
<i>k</i>	0.08	N/mm <sup>2</sup>

Quadro 4.6 – Classes de resistência do betão.

<b>Classes de Resistência do Betão</b>									
<b>Betão</b>	<b>C 12/15</b>	<b>C 16/20</b>	<b>C 20/25</b>	<b>C 25/30</b>	<b>C 30/37</b>	<b>C 35/45</b>	<b>C 40/50</b>	<b>C 45/55</b>	<b>C 50/60</b>
<i>f<sub>ck</sub></i> (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
<i>f<sub>ck,cube</sub></i> (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60
<i>f<sub>cm</sub></i> (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58
<i>f<sub>ctm</sub></i> (MPa)	1.6	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1
<i>f<sub>ctk,0,05</sub></i> (MPa)	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	2.9
<i>f<sub>ctk,0,95</sub></i> (MPa)	2.0	2.5	2.9	3.3	3.8	4.2	4.6	4.9	5.3
<i>E<sub>cm</sub></i> (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37
<i>e<sub>c1</sub></i> (‰)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5
<i>e<sub>cu1</sub></i> (‰)	3.5								
<i>e<sub>c2</sub></i> (‰)	2								
<i>e<sub>cu2</sub></i> (‰)	3.5								
<i>n</i>	2								
<i>e<sub>c3</sub></i> (‰)	1.75								
<i>e<sub>cu3</sub></i> (‰)	3.5								

Os esforços actuantes relevantes a determinar para este caso são o momento flector máximo  $M_{Ed}$  a meio vão e o esforço transverso máximo  $V_{Ed}$ , apresentados na figura 4.1 e resumidos no quadro 4.7.

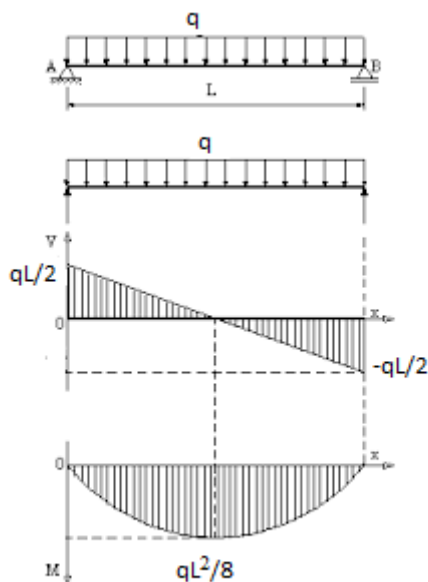


Figura 4.1 – Diagramas de momentos flectores e esforço transverso para uma laje de 1 vão.

Quadro 4.7 – Valores de cálculo das cargas actuantes e esforços resultantes.

<b>Valor característico das cargas:</b>		
$G_k$	5.5	kN/m <sup>2</sup>
$Q_k$	3.0	kN/m <sup>2</sup>
<b>À temperatura normal (a 20°C):</b>		
$q_{Ed}$	11.87	kN/m <sup>2</sup>
$M_{Ed\ max}$	23.74	kN.m/m
$V_{Ed\ max}$	11.87	kN/m
<b>Em situação de incêndio:</b>		
$\eta_{fi}$	0.65	EN 1993-1-2 cláusula 2.4.2
$q_{fi,Ed}$	6.96	kN/m <sup>2</sup>
$M_{fi,Ed\ max}$	15.43	kN.m/m
$V_{fi,Ed\ max}$	6.96	kN/m

As temperaturas na chapa calculadas a partir da equação (7) seguem resumidas no quadro 4.8:

Quadro 4.8 – Cálculo da temperatura nas várias partes da chapa metálica.

Parte da chapa metálica	R30	R60	R90	R120	R180
	$\Theta_a$	$\Theta_a$	$\Theta_a$	$\Theta_a$	$\Theta_a$
Banzo inferior	766.59	863.56	960.55	1017.88	1251.62
Alma	629.76	762.47	895.18	968.41	1293.31
Banzo superior	494.29	650.19	806.12	896.06	1274.12

Onde os parâmetros representados na figura 3.2, para o perfil H60 estão resumidos no quadro 4.9:

Quadro 4.9 – Parâmetros geométricos da chapa metálica.

Perfil H60			
$l_1$	=	105	mm
$l_2$	=	60	mm
$l_3$	=	50	mm
$h_2$	=	60	mm

O factor geométrico da nervura dado pela equação (8) e o factor  $\Phi$  definido na equação (9) resultam nos valores seguintes (ver quadro 4.10):

Quadro 4.10 – Cálculo do factor geométrico da nervura e do factor  $\Phi$ .

$A/L_r =$	26.31	mm
$\Phi =$	0.6	-

As temperaturas nos varões longitudinais, quando existentes, calculadas pela equação (10), estão sumariadas no quadro 4.11:

Quadro 4.11 – Cálculo da temperatura nos varões longitudinais.

$\Theta_s =$	334.15	°C	<b>R30</b>
$\Theta_s =$	501.90	°C	<b>R60</b>
$\Theta_s =$	669.70	°C	<b>R90</b>
$\Theta_s =$	772.13	°C	<b>R120</b>
$\Theta_s =$	1173.35	°C	<b>R180</b>

Os parâmetros da figura 3.3, são indicados no quadro 4.12.

Quadro 4.12 – Cálculo dos parâmetros de posicionamento dos varões longitudinais.

Perfil H60			
$u_1$	=	39.97	mm
$u_2$	=	42.43	mm
$u_3$	=	30	mm
$l/z$	=	0.49	-
$z$	=	2.023	mm <sup>-0.5</sup>

Para a determinação da temperatura do betão, a altura efectiva obtida das equações 12a) ou 12b) vem igual a (ver quadro 4.13):

Quadro 4.13 – Determinação da altura efectiva da laje.

$h_2/h_1$	=	0.67	-
$h_1$	=	90	mm
$h_{eff}$	=	121.9	mm
$h_{eff\ considerada}$	=	100	mm

Apesar da altura efectiva resultante das equações acima mencionadas ser igual a 122 mm, como o quadro 3.8 fornece valores até 100 mm, os valores a considerar para a temperatura do betão serão os correspondentes a  $h_{eff\ considerada}$ . Apesar de aproximados, estes valores estão do lado da segurança, pois para uma altura de 122 mm, as temperaturas seriam certamente mais baixas.

As temperaturas no betão, retiradas a partir do quadro 3.8 encontram-se resumidas no quadro 4.14:

Quadro 4.14 – Cálculo da temperatura no betão.

$\Theta_c =$	60	°C	<b>R30</b>
$\Theta_c =$	100	°C	<b>R60</b>
$\Theta_c =$	160	°C	<b>R90</b>
$\Theta_c =$	210	°C	<b>R120</b>
$\Theta_c =$	260	°C	<b>R180</b>

Determinadas as temperaturas em cada uma das componentes constituintes da laje mista, segue-se o cálculo dos coeficientes de redução  $k_{y,\theta}$  e  $k_{c,\theta}$ , no quadro 4.15, para cada um dos materiais após 30, 60, 90, 120 e 180 minutos de incêndio. Dos quadros 3.10, 3.11 e 3.12, verifica-se a necessidade de interpolar os valores dos coeficientes  $k$  para as temperaturas obtidas anteriormente.

Quadro 4.15 – Determinação dos factores de redução  $k_{y,\theta}$  e  $k_{c,\theta}$  nos diferentes materiais.

<b>R30</b>	AÇO ESTRUTURAL	$k_{y,\theta,i}$	0.15	(766.59°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.4	(629.76°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.79	(494.29°C)
	AÇO VARÕES	$k_{y,\theta,i}$	0.98	(334.15C)
	BETÃO	$k_{c,\theta,j}$	1	(60°C)
<b>R60</b>	AÇO ESTRUTURAL	$k_{y,\theta,i}$	0.08	(863.56°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.16	(762.47°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.35	(650.19°C)
	AÇO VARÕES	$k_{y,\theta,i}$	0.66	(501.90°C)
	BETÃO	$k_{c,\theta,j}$	1	(100°C)
<b>R90</b>	AÇO ESTRUTURAL	$k_{y,\theta,i}$	0.05	(960.55°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.06	(895.18°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.11	(806.12°C)
	AÇO VARÕES	$k_{y,\theta,i}$	0.2	(669.70°C)
	BETÃO	$k_{c,\theta,j}$	0.97	(160°C)
<b>R120</b>	AÇO ESTRUTURAL	$k_{y,\theta,i}$	0.04	(1017.88°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.05	(968.41°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0.06	(896.06°C)
	AÇO VARÕES	$k_{y,\theta,i}$	0.11	(772.13C)
	BETÃO	$k_{c,\theta,j}$	0.94	(210°C)
<b>R180</b>	AÇO ESTRUTURAL	$k_{y,\theta,i}$	0	(1251.62°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0	(1293.31°C)
		$k_{y,\theta,i}$	0	(1274.12°C)
	AÇO VARÕES	$k_{y,\theta,i}$	0.01	(1173.35°C)
	BETÃO	$k_{c,\theta,j}$	0.89	(260°C)

Atendendo às equações (23) e (24), o cálculo da posição do eixo neutro em milímetros para R30 é apresentado no quadro 4.18, para os casos em que não existe reforço longitudinal e com reforço de varões  $\phi 10$  ou  $\phi 12$ . As áreas da chapa e dos varões por nervura, são apresentadas nos quadros 4.16 e 4.17:

Quadro 4.16 – Determinação das áreas da chapa por nervura.

Áreas de aço da chapa		
<b>A banzo superior</b>	86.88	mm <sup>2</sup> /nervura
<b>A alma</b>	98.58	mm <sup>2</sup> /nervura
<b>A banzo inferior</b>	52.13	mm <sup>2</sup> /nervura

Quadro 4.17 – Determinação das áreas dos varões por nervura.

Áreas dos varões longitudinais		
<b>A<math>\phi 10</math></b>	79	mm <sup>2</sup> /nervura
<b>A<math>\phi 12</math></b>	113	mm <sup>2</sup> /nervura

Quadro 4.18 – Determinação da posição do eixo neutro para R30.

Posição do eixo neutro plástico - $x$ :			
R30	sem varões	$x$ (mm)	8.513
	com $\phi 10$	$x$ (mm)	17.399
	com $\phi 12$	$x$ (mm)	21.223

Para R60, R90, R120 e R180 o procedimento é idêntico. Da análise dos resultados obtidos, verifica-se a crescente aproximação do eixo neutro plástico à superfície superior da laje, à medida que a duração do incêndio aumenta.

Da equação (22), resultam os valores calculados no quadro 4.19 de  $M_{f_i,Rd}^+$ , para a verificação da segurança à flexão.

Quadro 4.19 – Determinação do momento resistente  $M_{f_i,Rd}^+$ .

Perfil H60							
R30	$x$ (mm)	8.513	$M_{f_i,Rd}^+$	=	18.09	kN.m/m	sem varões
	$x$ (mm)	17.399	$M_{f_i,Rd}^+$	=	38.30	kN.m/m	$\phi 10$
	$x$ (mm)	21.223	$M_{f_i,Rd}^+$	=	46.49	kN.m/m	$\phi 12$
R60	$x$ (mm)	3.699	$M_{f_i,Rd}^+$	=	8.06	kN.m/m	sem varões
	$x$ (mm)	9.683	$M_{f_i,Rd}^+$	=	22.47	kN.m/m	$\phi 10$
	$x$ (mm)	12.259	$M_{f_i,Rd}^+$	=	28.43	kN.m/m	$\phi 12$
R90	$x$ (mm)	1.369	$M_{f_i,Rd}^+$	=	3.04	kN.m/m	sem varões
	$x$ (mm)	3.239	$M_{f_i,Rd}^+$	=	7.58	kN.m/m	$\phi 10$
	$x$ (mm)	4.043	$M_{f_i,Rd}^+$	=	9.51	kN.m/m	$\phi 12$
R120	$x$ (mm)	0.956	$M_{f_i,Rd}^+$	=	2.13	kN.m/m	sem varões
	$x$ (mm)	2.017	$M_{f_i,Rd}^+$	=	4.65	kN.m/m	$\phi 10$
	$x$ (mm)	2.473	$M_{f_i,Rd}^+$	=	5.72	kN.m/m	$\phi 12$
R180	$x$ (mm)	0.00	$M_{f_i,Rd}^+$	=	0.00	kN.m/m	sem varões
	$x$ (mm)	0.102	$M_{f_i,Rd}^+$	=	0.23	kN.m/m	$\phi 10$
	$x$ (mm)	0.146	$M_{f_i,Rd}^+$	=	0.33	kN.m/m	$\phi 12$

Para a verificação ao corte vertical, foram igualmente estudados os casos sem varões longitudinais e com varões  $\phi 10$  ou  $\phi 12$ . Note-se que nos cálculos aparecem os valores da resistência ao corte longitudinal com e sem a contribuição da chapa metálica (ver quadro 4.20).



Quadro 4.20 – Verificação ao corte vertical à temperatura ambiente.

Sem varões		Varões $\phi 10$		Varões $\phi 12$	
$V_{v,Rd} = V_{Rd,c}$	<b>H60</b>	$V_{v,Rd} = V_{Rd,c}$	<b>H60</b>	$V_{v,Rd} = V_{Rd,c}$	<b>H60</b>
$C_{Rd,c}$	0.12	$C_{Rd,c}$	0.12	$C_{Rd,c}$	0.12
$k$	2.00	$k$	2.00	$k$	2.00
$\rho_l$	0.000	$\rho_l$	0.008	$\rho_l$	0.012
$A_{st}$ (mm <sup>2</sup> /m)		$A_{st}$ (mm <sup>2</sup> /m)	79	$A_{st}$ (mm <sup>2</sup> /m)	113.0
$f_{ck}$ (MPa)	25	$f_{ck}$ (MPa)	25	$f_{ck}$ (MPa)	25
$k_1$	0.15	$k_1$	0.15	$k_1$	0.15
$\sigma_{cp}$ (Mpa)	0.00	$\sigma_{cp}$ (Mpa)	0.00	$\sigma_{cp}$ (Mpa)	0.00
$b_w$ (mm)	84.0	$b_w$ (mm)	84	$b_w$ (mm)	84.0
$d$ (mm)	116.0	$d$ (mm)	116.0	$d$ (mm)	116.0
$v_{min}$	0.49	$v_{min}$	0.49	$v_{min}$	0.49
$V_{Rd,c}$ (N/nervura)	0	$V_{Rd,c}$ (N/nervura)	6376.149	$V_{Rd,c}$ (N/nervura)	7184.153
$V_{Rd,c}$ (kN/nervura)	0.00	$V_{Rd,c}$ (kN/nervura)	6.38	$V_{Rd,c}$ (kN/nervura)	7.18
$V_{Rd,c min}$ (N/nervura)	4823.03	$V_{Rd,c min}$ (N/nervura)	4823.03	$V_{Rd,c min}$ (N/nervura)	4823.03
$V_{Rd,c min}$ (kN/nervura)	4.82	$V_{Rd,c min}$ (kN/nervura)	4.82	$V_{Rd,c min}$ (kN/nervura)	4.82
$V_{v,Rd}$ (kN/m)	23.53	$V_{v,Rd}$ (kN/m)	31.10	$V_{v,Rd}$ (kN/m)	35.04
$V_{Rd}$ com chapa (kN/m)	125.28	$V_{Rd}$ com chapa (kN/m)	132.85	$V_{Rd}$ com chapa (kN/m)	136.79

Como se pode verificar, o aumento da resistência ao corte vertical aumenta cerca de 77% com a contribuição da chapa metálica. Para o cálculo da resistência ao corte vertical a elevadas temperaturas, o procedimento é o mesmo, variando apenas o valor de cálculo da resistência ao corte longitudinal da chapa. Logicamente, devido à variação dos coeficientes de redução  $k_{y,\theta}$ , à medida que a duração do incêndio aumenta, este valor irá diminuir. Para melhor compreensão, esta variação é exposta na figura 4.2.

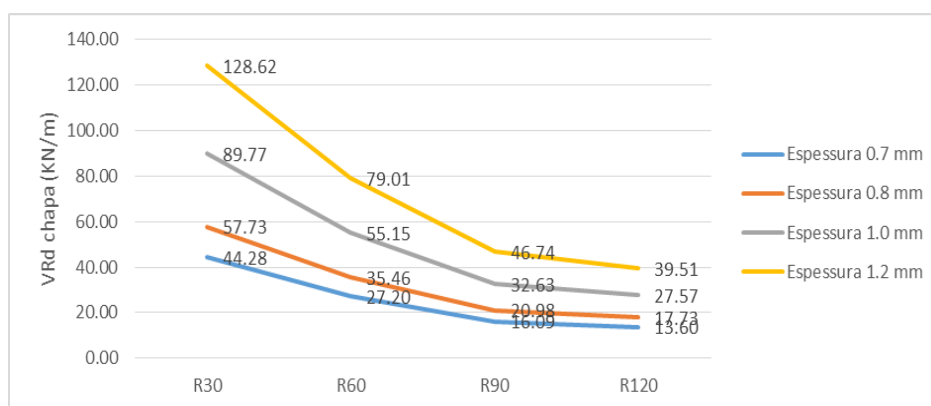


Figura 4.2 – Gráfico da variação da resistência ao corte vertical da chapa em situação de incêndio

Apresenta-se no quadro 4.21 para R30, para os mesmos casos anteriormente considerados, os valores finais da resistência ao corte vertical.

Quadro 4.21 – Verificação ao corte vertical para R30.

Sem varões		Varões $\phi 10$		Varões $\phi 12$	
$V_{v,fi,Rd}$ (kN/m)	23.53	$V_{v,fi,Rd}$ (kN/m)	31.10	$V_{v,fi,Rd}$ (kN/m)	35.04
$V_{v,fi,Rd}$ com chapa (kN/m)	113.30	$V_{v,fi,Rd}$ com chapa (kN/m)	120.87	$V_{v,fi,Rd}$ com chapa (kN/m)	124.81

Finalmente, para a verificação ao corte longitudinal, pelo método da conexão parcial, com e sem ancoragem de extremidade, apresentam-se os valores finais obtidos para os momentos resistentes obtidos.

Sem ancoragem de extremidade (ver quadro 4.22):

Quadro 4.22 – Verificação ao corte longitudinal sem ancoragem de extremidade.

Resistência ao corte longitudinal											
$L$ (m)	4										
fracção $L$ (mm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Temperatura ambiente; sem varões											
$M_{Rd}$ (kN.m/m)	8.3	12.4	16.5	19.9	23.1	26.2	29.3	32.4	35.5	38.6	41.6
Temperatura ambiente; com varões $\phi 12$											
$M_{Rd}$ (kN.m/m)	39.7	43.4	47.1	50.1	52.9	55.7	58.4	61.1	63.9	66.5	69.2
R30; sem varões											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	1.2	4.8	8.3	11.9	15.7	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
R30; com varões $\phi 12$											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	32.0	35.2	38.3	41.6	45.0	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
R60; sem varões											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	0.7	4.2	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
R60; com varões $\phi 12$											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	21.7	25.0	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4
R90; sem varões											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	0.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
R90; com varões $\phi 12$											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	6.9	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
R120; sem varões											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	0.3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
R120; com varões $\phi 12$											
$M_{fi,Rd}$ (kN.m/m)	3.9	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7

Os resultados estão resumidos na figura 4.3 que se segue:

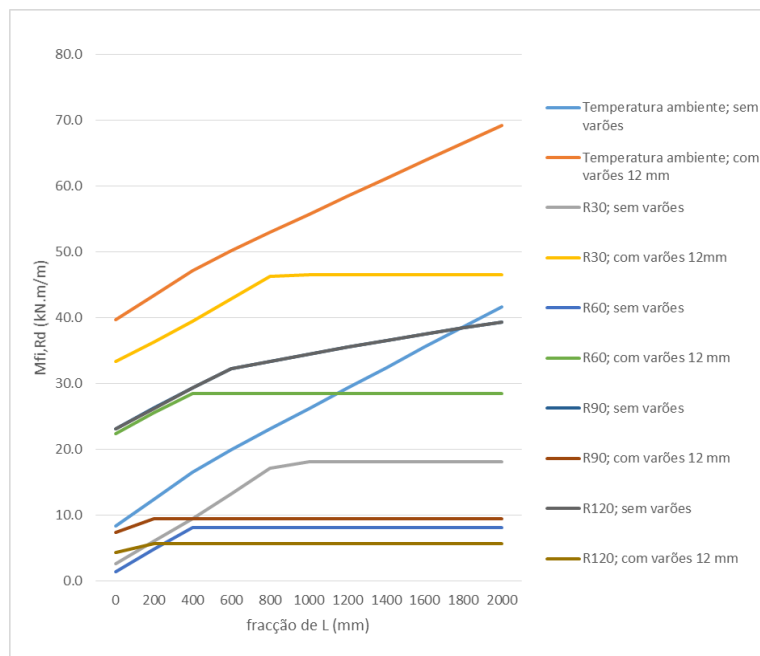


Figura 4.3 – Gráfico da variação da resistência ao corte longitudinal sem ancoragem de extremidade.

Com ancoragem de extremidade, obtida pela soldadura de conectores de 19 mm directamente na chapa (ver quadro 4.23), verifica-se pela figura 4.4, a variação da resistência ao corte longitudinal.

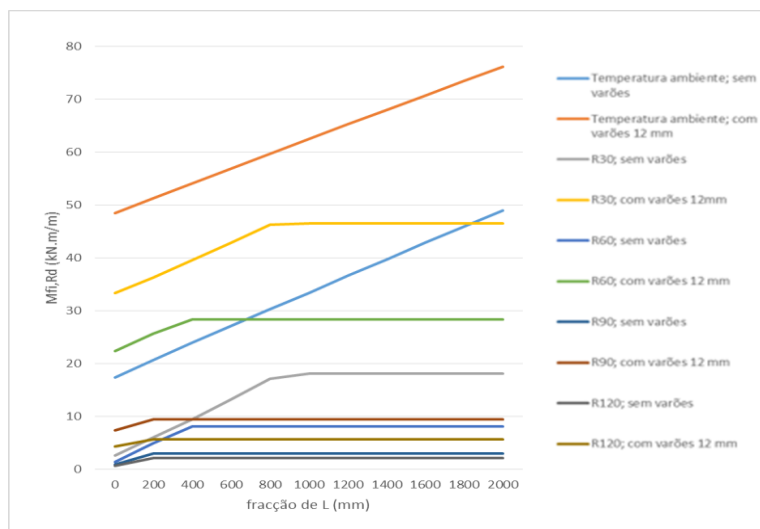


Figura 4.4 – Gráfico da variação da resistência ao corte longitudinal com ancoragem de extremidade.

Quadro 4.23 – Verificação ao corte longitudinal com ancoragem de extremidade.

<b>Resistência ao corte longitudinal</b>											
<i>L</i> (m)	4										
fracção <i>L</i> (mm)	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
<b>Temperatura ambiente; sem varões</b>											
<i>M<sub>Rd</sub></i> (kN.m/m)	17.4	20.7	23.9	27.1	30.3	33.4	36.6	39.7	42.8	45.9	48.9
<b>Temperatura ambiente; com varões <math>\phi</math> 12</b>											
<i>M<sub>Rd</sub></i> (kN.m/m)	48.4	51.3	54.1	56.9	59.7	62.5	65.3	68.0	70.7	73.4	76.1
<b>R30; sem varões</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	2.6	6.0	9.5	13.2	17.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
<b>R30; com varões <math>\phi</math> 12</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	33.3	36.3	39.5	42.8	46.3	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5
<b>R60; sem varões</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	1.4	4.9	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
<b>R60; com varões <math>\phi</math> 12</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	22.4	25.6	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4	28.4
<b>R90; sem varões</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	0.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<b>R90; com varões <math>\phi</math> 12</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	7.4	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
<b>R120; sem varões</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	0.7	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
<b>R120; com varões <math>\phi</math> 12</b>											
<i>M<sub>fi,Rd</sub></i> (kN.m/m)	4.3	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7

Analisando os quadros expostos e os gráficos, retiramos a conclusão de que nas situações onde existem ancoragens de extremidade, as resistências ao corte longitudinal são superiores. Este facto é facilmente explicado tendo em conta que as ancoragens de extremidade contribuem para a solidarização dos dois materiais (chapa metálica e betão), que trabalhando em conjunto, oferecem uma maior resistência ao corte longitudinal.

Fazem-se as verificações finais deste exemplo de cálculo no quadro 4.24, tendo em conta os modos de rotura acima mencionados.

Quadro 4.24 – Esforços actuantes em situação de incêndio.

<b>Esforços actuantes:</b>		
Em situação de incêndio		
<b>Momento actuante máximo positivo – <math>M_{fi,Ed}^+</math></b>	15.43	kN.m
<b>Momento actuante máximo negativo – <math>M_{fi,Ed}^-</math></b>	0	kN.m
<b>Esforço transverso máximo – <math>V_{fi,Ed}</math></b>	6.96	kN

Estados limites últimos de flexão (ver quadro 4.25):

Quadro 4.25 – Verificação da resistência da laje à flexão.

<b>FLEXÃO</b>	
<b>Perfil:</b>	H60
$M_{fi,Rd}^+$	18.09 kN.m
<b>Condição:</b>	$M_{fi,Rd}^+ > M_{fi,Ed}^+$
<b>Verificação</b>	<b>OK</b>
<b>Resistência ao fogo</b>	<b>R30</b>

Estados limites últimos de corte vertical (ver quadro 4.26):

Quadro 4.26 – Verificação da resistência da laje ao corte vertical.

<b>CORTE VERTICAL</b>		
<b>Perfil:</b>	H60	
$V_{v,fi,Rd}$ (kN)	<b>Verificação</b>	
sem varões	23.53	<b>OK</b>
varões $\phi 10$	31.10	<b>OK</b>
varões $\phi 12$	35.04	<b>OK</b>
<b>Resistência ao fogo</b>	<b>R180</b>	

Estados limites últimos de corte longitudinal – sem ancoragem de extremidade (ver quadro 4.27):

Quadro 4.27 – Verificação da resistência da laje ao corte longitudinal.

<b>CORTE LONGITUDINAL</b>	
Método conexão parcial	
<b>Perfil:</b>	H60
$L$ (m)	4
$M_{fi,Rd}$ (kN.m)	18.10
<b>Verificação</b>	<b>OK</b>
<b>Resistência ao fogo</b>	<b>R30</b>

Estados limites últimos de corte longitudinal – com ancoragem de extremidade (ver quadro 4.28):

Quadro 4.28 – Verificação da resistência da laje ao corte longitudinal.

<b>CORTE LONGITUDINAL</b>	
Método conexão parcial	
<b>Perfil:</b>	H60
$L$ (m)	4
$M_{fi,Rd}$ (kN.m)	18.10
<b>Verificação</b>	<b>OK</b>
<b>Resistência ao fogo</b>	<b>R30</b>

Conclui-se assim, que a resistência ao fogo desta laje é condicionada pela flexão e pelo corte longitudinal, resultando numa resistência R30 sem varões longitudinais. É igualmente verificado o disposto na cláusula 4.3.2 (5) da EN 1994-1-2.

### 4.3 Caso de estudo 2: exemplo de cálculo de lajes mistas de 2 tramos

Para o caso de estudo de uma laje mista contínua com 2 tramos iguais, além dos esforços actuantes considerados em 4.1, será necessário verificar a segurança à flexão para o momento máximo actuante ao nível dos apoios. Segue uma figura elucidativa do cálculo destes esforços (figura 4.5).

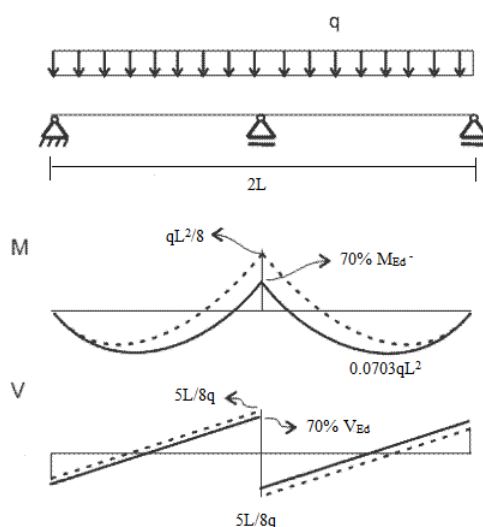


Figura 4.5 – Diagramas de momentos flectores e esforço transversal para uma laje de 2 vãos.

Como representado nos diagramas da figura anterior, o momento máximo negativo no apoio interno sofre uma redução de 30%, que se traduzirá num aumento igual dos momentos máximos positivos. Esta redistribuição de momentos flectores e esforço transversal é sugerida na cláusula 9.4.2 (3) da EN 1994-1-1. Os esforços resultantes apresentam-se resumidos no quadro 4.29.

Quadro 4.29 – Valores de cálculo das cargas actuantes e esforços resultantes.

À temperatura normal (a 20°C):		
$q_{Ed}$	11.87	kN/m <sup>2</sup>
$M_{Ed\ max}^+$	17.36	kN.m/m
$M_{Ed\ max}^-$	16.62	kN.m/m
$V_{Ed\ max}$	0.15	kN/m
Em situação de incêndio:		
$\eta_{fi}$	0.65	EN 1993-1-2 cláusula 2.4.2
$M_{fi,Ed\ max}^+$	11.28	kN.m/m
$M_{fi,Ed\ max}^-$	10.80	kN.m/m
$V_{fi,Ed\ max}$	0.10	kN/m

Quanto às verificações a efectuar para este caso, é necessário ainda garantir a segurança aos estados limites últimos de flexão para o momento máximo negativo na zona do apoio interno. As restantes verificações mantêm-se idênticas ao caso de uma laje de um tramo, sendo que os modos de rotura de flexão e corte longitudinal continuam a condicionar a resistência ao fogo, que pertence à classe R30, sem varões longitudinais de reforço. Por esta razão, e com o intuito de não tornar a análise exaustiva e repetitiva, apenas se apresentará o cálculo e verificação relativo ao  $M_{fi,Rd}$ .

Como mencionado no subcapítulo 3.5.1.2, como simplificação considera-se somente o betão dentro da nervura a resistir. No entanto, é necessário considerar uma área reduzida, pois o betão acima de determinada temperatura  $\Theta_{lim}$  é negligenciado. O cálculo desta temperatura, dada pela equação (13), encontra-se resumido no quadro 4.30.

Quadro 4.30 – Cálculo da temperatura limite no betão.

Temperatura limite	R30	R60	R90	R120	R180
	$\Theta_{lim}$	$\Theta_{lim}$	$\Theta_{lim}$	$\Theta_{lim}$	$\Theta_{lim}$
	408.74	535.4	662.0	745.8	1041.8

Os parâmetros necessários para o cálculo da temperatura limite estão sumariados no quadro 4.31:

Quadro 4.31 – Determinação dos parâmetros necessários ap cálculo de  $\Theta_{lim}$ .

	R30	R60	R90	R120	R180
$d_0$	679.001	867	1055	1144	1619.006
$d_1$	-0.00013	-0.00019	-0.00022	-0.00022	-0.00028
$d_2$	-7.591	-8.75	-9.91	-9.71	-13.396
$d_3$	-91.99	-123	-154	-166	-246.94
$d_4$	-766	-1378	-1990	-2155	-3826
$\Phi$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$A/L_r$	26.31	26.31	26.31	26.31	26.31
$1/l_3$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
$N_s (\phi 10)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

O cálculo da área reduzida de betão passa pela determinação das coordenadas dos pontos, dada pelas equações (14) a (20). Nos quadros 4.32 e 4.33, encontram-se os valores obtidos para o traçado das áreas reduzidas de betão.

Quadro 4.32 – Determinação das coordenadas  $X$  e  $Y$  para a delimitação da área reduzida.

R30			R60		
$X_I$	0	mm	$X_I$	0	mm
$X_{II}$	24.60	mm	$X_{II}$	22.00	mm
$X_{III}$	47.17	mm	$X_{III}$	45.20	mm
$X_{IV}$	77.50	mm	$X_{IV}$	77.50	mm
$Y_I$	7.80	mm	$Y_I$	11.50	mm
$Y_{II}$	7.80	mm	$Y_{II}$	11.50	mm
$Y_{III}$	60	mm	$Y_{III}$	60	mm
$Y_{IV}$	64.99	mm	$Y_{IV}$	66.84	mm
<b>Declive alma</b>	23.34		<b>Declive alma</b>	25.54	
R90			R120		
$X_I$	0	mm	$X_I$	0	mm
$X_{II}$	17.90	mm	$X_{II}$	14.50	mm
$X_{III}$	42.42	mm	$X_{III}$	40.34	mm
$X_{IV}$	77.50	mm	$X_{IV}$	77.50	mm
$Y_I$	17.40	mm	$Y_I$	22.40	mm
$Y_{II}$	17.40	mm	$Y_{II}$	22.40	mm
$Y_{III}$	60	mm	$Y_{III}$	60	mm
$Y_{IV}$	69.44	mm	$Y_{IV}$	71.39	mm
<b>Declive alma</b>	29.95		<b>Declive alma</b>	34.48	

Quadro 4.33 – Determinação dos parâmetros necessários ao cálculo das coordenadas  $X$  e  $Y$ .

$z$ (R30)	1.47	mm <sup>-0.5</sup>	$a$ (R30)	29.9	$c$ (R30)	-52.46	$b$ (R30)	4.99
$z$ (R60)	1.62	mm <sup>-0.5</sup>	$a$ (R60)	23.3	$c$ (R60)	-47.45	$b$ (R60)	6.84
$z$ (R90)	1.78	mm <sup>-0.5</sup>	$a$ (R90)	18.3	$c$ (R90)	-43.16	$b$ (R90)	9.44
$z$ (R120)	1.88	mm <sup>-0.5</sup>	$a$ (R120)	16.0	$c$ (R120)	-41.00	$b$ (R120)	11.39
$z$ (R180)	2.31	mm <sup>-0.5</sup>	$a$ (R180)	9.1	$c$ (R180)	-33.39	$b$ (R180)	29.88
$\alpha$	69.446	°						

Para o exemplo de resistência ao fogo R30, apresenta-se a figura 4.6 com a respectiva área de betão reduzida:

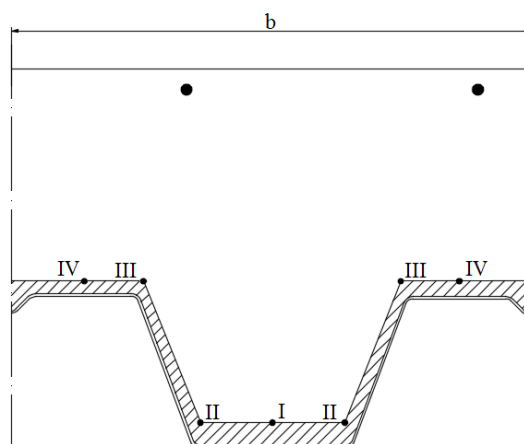


Figura 4.6 – Representação da área reduzida de betão após 30 minutos de exposição ao fogo.



Para definir os coeficientes de redução  $k$  do betão apresentados no quadro 3.13, é necessário determinar a temperatura do mesmo. Como se verifica da análise do quadro 3.8, a temperatura no betão é definida em faixas de 5 mm de espessura. Mais uma vez, à semelhança da aproximação efectuada para a determinação da temperatura do betão para o cálculo de  $M_{fi,Rd}^+$ , considera-se o betão a resistir todo à mesma temperatura. Este valor não é tomado igual a  $\Theta_{lim}$  por se considerar ser uma situação muito desfavorável e afastada da realidade física. Assim, como aproximação, adoptou-se como temperatura global o valor correspondente a um terço da altura da nervura de betão considerada. No quadro 4.34 são indicadas as temperaturas adoptadas e o cálculo do respectivo coeficiente de redução.

Quadro 4.34 – Determinação da temperatura no betão, dos coeficientes de redução  $k$  e da resistência do betão a elevadas temperaturas.

<b>R 30</b>				<b>R 60</b>			
$\Theta_c$	=	350.00	°C	$\Theta_c$	=	525.00	°C
$f_{c,j}$	=	25	Mpa	$f_{c,j}$	=	25	Mpa
$k_{c,\theta,j}$	=	0.80	-	$k_{c,\theta,j}$	=	0.56	-
$f_{c,j,\theta}$	=	20.00	Mpa	$f_{c,j,\theta}$	=	14.00	Mpa
<b>R 90</b>				<b>R 120</b>			
$\Theta_c$	=	627.00	°C	$\Theta_c$	=	493.00	°C
$f_{c,j}$	=	25	Mpa	$f_{c,j}$	=	25	Mpa
$k_{c,\theta,j}$	=	0.41	-	$k_{c,\theta,j}$	=	0.60	-
$f_{c,j,\theta}$	=	10.25	Mpa	$f_{c,j,\theta}$	=	15.00	Mpa

Atendendo à equação (23), o cálculo da posição do eixo neutro em milímetros para R30 é apresentado no quadro 4.36, para os casos em que existe armadura negativa. A área dos varões por nervura é apresentada no quadro 4.35. Para as restantes classes de resistência ao fogo, o procedimento é idêntico.

Quadro 4.35 – Determinação da área de armadura negativa por nervura.

<b>Área de armadura negativa</b>		
$\phi 10 // 0.15$	108.23	mm <sup>2</sup> /nervura

Quadro 4.36 – Determinação da posição do eixo neutro para R30.

<b>Posição do eixo neutro plástico - x:</b>			
<b>R30</b>	<b>s/ armadura negativa</b>	x (mm)	0.000
	<b>c/ armadura negativa</b>	x (mm)	69.774

Da equação (22), resultam no quadro 4.37 os valores calculados para  $M_{fi,Rd}^-$ , para a verificação da segurança à flexão:

Quadro 4.37 – Determinação do momento resistente  $M_{fi,Rd}^-$ .

Perfil H60							
<b>R30</b>	$x$ (mm)	0.000	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	0.00	kN.m/m	s/ armadura negativa
	$x$ (mm)	69.774	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	29.65	kN.m/m	c/ armadura negativa
<b>R60</b>	$x$ (mm)	0.000	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	0.00	kN.m/m	s/ armadura negativa
	$x$ (mm)	76.395	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	29.62	kN.m/m	c/ armadura negativa
<b>R90</b>	$x$ (mm)	0.000	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	0.00	kN.m/m	s/ armadura negativa
	$x$ (mm)	77.873	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	29.75	kN.m/m	c/ armadura negativa
<b>R120</b>	$x$ (mm)	0.000	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	0.00	kN.m/m	s/ armadura negativa
	$x$ (mm)	83.272	$M_{fi,t,Rd}^-$	=	29.10	kN.m/m	c/ armadura negativa

Segue-se a verificação dos estados limites últimos de flexão, somente para o momento negativo (ver quadro 4.38 e 4.39).

Quadro 4.38 – Esforços actuantes em situação de incêndio.

Esforços actuantes:		
Em situação de incêndio		
Momento actuante máximo positivo – $M_{fi,Ed}^+$	11.28	kN.m
Momento actuante máximo negativo – $M_{fi,Ed}^-$	10.80	kN.m
Esforço transversal máximo – $V_{fi,Ed}$	0.10	kN

Quadro 4.39 – Verificação da resistência da laje à flexão.

Flexão:	
Perfil:	H60
$M_{fi,Rd}^-$	29.10   kN.m
Condição:	$M_{fi,Rd}^- > M_{fi,Ed}^-$
Verificação	<b>OK</b>
Resistência ao fogo	<b>R120</b>

#### 4.4 Desenvolvimento de tabelas

A necessidade de desenvolver as tabelas de cálculo directo da resistência ao fogo abaixo apresentadas, surgiu pela falta de apoio aos projectistas que existe neste campo. A informação de que dispõem estes profissionais por parte dos fabricantes é bastante limitada e incompleta. Os catálogos que fazem referência à resistência ao fogo dos seus produtos, indicam somente que a resistência mínima verificada pertence à classe R30. No entanto, se se pretender uma

resistência superior à referida, os projectistas terão de proceder ao cálculo específico com base nos Eurocódigos. Deste modo, as tabelas desenvolvidas no âmbito deste trabalho permitem facilitar e simplificar a vertente da determinação da resistência ao fogo nos projectos de estruturas com lajes mistas.

Como referido anteriormente, são apresentadas tabelas de cálculo directo da resistência ao fogo para várias configurações de lajes mistas. Estas dependem de diversos parâmetros tais como: i) a classe do betão; ii) perfil da chapa; iii) espessura da chapa; iv) altura total da laje; v) número de vãos; vi) comprimento dos vãos e, vii) tipo de reforço. Face à infinidade de soluções possíveis, escolheram-se as tabelas que se consideram mais relevantes e onde nos é permitido detectar e avaliar as diferenças com maior destaque. Assim, apresenta-se um conjunto de oito tabelas todas pertencentes à mesma classe de resistência do betão, C25/30, quatro delas com um perfil de chapa H60, sendo as restantes consideradas com o perfil H120. Para uniformizar os resultados, a espessura adoptada para as chapas é de 1.0 mm e, com o objectivo de avaliar a influência na resistência da colocação de varões longitudinais nas nervuras, são expostas tabelas sem varões e com a introdução destes.

Para a construção destas tabelas, recorreu-se ao catálogo do fabricante “O Feliz” para extrair os valores das cargas  $q$  (kN/m<sup>2</sup>), às quais as várias configurações de lajes mistas resistem à temperatura ambiente. A transição do cálculo à temperatura ambiente para elevadas temperaturas, como é o caso, fez-se através da multiplicação dos esforços resultantes da carga anterior  $q$  pelo coeficiente 0.65 (ver subcapítulo 3.2.3).

De seguida, apresentam-se as tabelas de cálculo directo. No quadro 4.41, são contempladas as lajes mistas de 1 tramo. Por outro lado, o quadro 4.42 refere-se a lajes mistas de 2 tramos com igual comprimento. A legenda do quadro 4.40 permite a identificação do modo de rotura condicionante.

Quadro 4.40 – Legenda indicativa do modo de rotura condicionante.

	Flexão
	Corte longitudinal
	Corte vertical

Quadro 4.41 – Tabelas de cálculo da resistência ao fogo para lajes mistas de 1 tramo.

<b>CHAPA METÁLICA: H60 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: sem varões</b>											
<b>Vão (m)</b>	<b>Altura da laje (cm)</b>										
	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R60	R60	R60	R60	R60
<b>3</b>	R30	R30	R30	R30	R30	R60	R30	R30	R30	R30	R30
<b>4</b>	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30
<b>5</b>	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30
<b>6</b>	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30
<b>CHAPA METÁLICA: H60 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: com varões <math>\phi 12</math></b>											
<b>Vão (m)</b>	<b>Altura da laje (cm)</b>										
	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>3</b>	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>4</b>	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>5</b>	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>6</b>	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>CHAPA METÁLICA: H120 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: sem varões</b>											
<b>Vão (m)</b>	<b>Altura da laje (cm)</b>										
	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	-	-	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>3</b>	-	-	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>4</b>	-	-	-	R90	R60	R60	R30	R60	R60	R60	R60
<b>5</b>	-	-	-	-	-	-	R60	R60	R60	R60	R60
<b>6</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R60	R60
<b>CHAPA METÁLICA: H120 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: com varões <math>\phi 12</math></b>											
<b>Vão (m)</b>	<b>Altura da laje (cm)</b>										
	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
<b>3</b>	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
<b>4</b>	-	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
<b>5</b>	-	-	-	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120
<b>6</b>	-	-	-	-	-	-	R120	R120	R120	R120	R120

Quadro 4.42 – Tabelas de cálculo da resistência ao fogo para lajes mistas de 2 tramos.

<b>CHAPA METÁLICA: H60 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: sem varões</b>											
Vão (m)	Altura da laje (cm)										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R60	R60	R60	R60	R60
3	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30	R30
4	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
5	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
6	-	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
<b>CHAPA METÁLICA: H60 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: com varões <math>\phi 12</math></b>											
Vão (m)	Altura da laje (cm)										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2	R90	R90	R90	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
3	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90
4	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90
5	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90	R90
6	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
<b>CHAPA METÁLICA: H120 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: sem varões</b>											
Vão (m)	Altura da laje (cm)										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2	-	-	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
3	-	-	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
4	-	-	R90	R90	R60	R60	R60	R60	R60	R60	R60
5	-	-	-	-	-	R90	R90	R90	R60	R60	R60
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CHAPA METÁLICA: H120 1.0 mm</b>											
<b>CONDIÇÕES DE REFORÇO: com varões <math>\phi 12</math></b>											
Vão (m)	Altura da laje (cm)										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
2	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
3	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
4	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120	R120
5	-	-	-	-	-	R120	R120	R120	R120	R120	R120
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tendo em conta o quadro 4.40, concluímos que a flexão é modo de rotura condicionante. Esta situação era expectável através do quadro 4.21, que mostra que a consideração da resistência ao corte vertical da chapa aumenta bastante a resistência do conjunto a este modo de rotura.

## 4.5 Conclusões

Comparando os valores obtidos e apresentados nas tabelas 4.41 e 4.42 em que o único parâmetro que difere é o perfil da chapa escolhido, verifica-se um aumento de resistência ao fogo ao passar das lajes com o perfil H60 para lajes equivalentes (com a mesma altura) mas com perfil H120. Sem armadura de reforço, as lajes com perfil H60 são em geral R30 e com H120, são classificadas como R60. A mesma tendência se verifica nas lajes com varões. Pela capacidade desta chapa de altura elevada oferecer maior resistência e capacidade de suporte, a utilização deste perfil face ao H60 permite, para a obtenção da mesma classe de resistência, uma diminuição da altura total da laje bem como a consideração de uma espessura inferior. Estas vantagens traduzem-se naturalmente, numa economia de material e consequentemente, do custo total da obra. Relativamente à influência da colocação de um varão longitudinal  $\phi 12$  por nervura, não somente contribui para um aumento da resistência ao fogo, mas também à temperatura ambiente. A aplicação deste reforço exerce um efeito benéfico, permitindo aos projectistas optarem por uma espessura da chapa ou altura da laje inferior. A introdução de varões de aço longitudinais nas nervuras como solução de melhoria da resistência de lajes mistas tem inúmeras vantagens comparativamente com soluções correntes, tais como aplicação de tectos falsos ou revestimento com recurso a tintas intumescentes. De seguida, apresenta-se no quadro 4.43 um resumo comparativo das três soluções acima explicitadas.

Quadro 4.43 – Análise comparativa de soluções de melhoria da resistência.

	<b>Tinta intumescente</b>	<b>Tecto falso</b>	<b>Varão longitudinal (<math>\phi 12</math>; A500 NR)</b>
Características	Mão-de-obra especializada	Mão-de-obra especializada	Sem necessidade de mão-de-obra especializada
	Necessidade de manutenção	Sem necessidade de manutenção	Sem necessidade de manutenção
	Acabamento estético	Acabamento estético	Chapa metálica à vista
	Aumento da resistência ao fogo	Aumento da resistência ao fogo	Aumento da resistência ao fogo e à temperatura ambiente
Preço (€/m <sup>2</sup> )	17 a 20 <sup>(2)</sup>	30	3.22

Da análise do quadro 4.43, são perceptíveis as vantagens da adopção de varões longitudinais face às restantes alternativas ( - aspecto positivo; - aspecto negativo).

<sup>(2)</sup> Preços para R30. Acresce 10€ para R60.

## 5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido e resumido nesta dissertação insere-se no projecto *INOV-LAMI*, cujo objectivo global é o desenvolvimento de soluções que permitam melhorar o desempenho de lajes mistas sob diversas condições, nomeadamente à temperatura ambiente e em situações de incêndio. A avaliação efectuada para a resistência destes elementos ao fogo constitui uma tarefa inicial do estudo de âmbito mais alargado.

Numa primeira fase, para além da pesquisa bibliográfica, foram apresentadas e detalhadas todas as metodologias regulamentares aplicáveis ao cálculo das lajes mistas ao fogo.

Para cumprir os objectivos propostos, foi desenvolvida uma folha de cálculo em *Excel* com todas as disposições regulamentares apresentadas nos Eurocódigos consultados, tanto para o cálculo de acções e combinações bem como para a verificação da resistência ao fogo. Escolhendo a classe de resistência do betão, perfil e espessura da chapa, altura total da laje, número e comprimento dos vãos e, condições de reforço, a classe de resistência ao fogo é obtida automaticamente. A folha desenvolvida permite ainda, obter informações sobre qual o modo de rotura condicionante.

Através deste estudo e da avaliação dos resultados obtidos, foi possível confirmar a veracidade da cláusula 4.3.2 (5) presente na EN 1994-1-2, quando aplicada aos casos de estudo considerados (perfis H60 e H120), que indica que a resistência de lajes mistas, com ou sem reforço adicional, calculadas segundo a EN 1994-1-1 é no mínimo R30. Foi igualmente possível testar e viabilizar a colocação de varões longitudinais como uma solução de melhoria eficaz e económica, sendo que com estes, as classes de resistência ao fogo aumentam significativamente, no mínimo para a classe R120 com base nos casos estudados.

### 5.2 Desenvolvimentos futuros

Como trabalhos futuros a desenvolver no âmbito desta vertente do projecto, propõe-se:

- Completar o estudo analítico e experimental do perfil H120;
- Realizar um estudo numérico para verificar os resultados obtidos por via regulamentar;
- Realizar um estudo com outras soluções de reforço, nomeadamente as previstas no projecto *INOV-LAMI*, e comparar com a solução adoptada neste trabalho;

- Propor melhorias face à falta de informação registada nos regulamentos vigentes, nomeadamente nas verificações contempladas pelo Anexo D da EN 1994-1-2, que adicionalmente deve incluir o corte longitudinal, corte vertical e a deformação. No cálculo das temperaturas nos elementos para a determinação de  $M_{fi,Rd}^+$ , foram detectadas omissões para o cálculo destas relativamente ao betão;
- Alargar o estudo a outras configurações de chapa metálica.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bailey, C. G. (2002). "Efficient Arrangement of Reinforcement for Membrane Behaviour of Composite Floor Slabs in Fire Conditions" *Journal of Constructional Steel Research* 59 (2003), pp. 931-949.
- Bailey, C. G., Toh, W. S. (2007). "Behaviour of Concrete Floor Slabs at Ambient and Elevated Temperatures" *Fire Safety Journal* 42 (2007), pp. 425-436.
- Calado, L., Santos, J. (2010) "Estruturas Mistas de Aço e Betão". IST Press, Lisboa.
- Chen, L. Z., et al. (2015). "Behaviour and Design of Shear Connectors in Composite Slabs at Elevated Temperatures" *Journal of Constructional Steel Research* 115 (2015), pp. 387-397.
- Cooke, G. M. E., et al. (1988). "Fire Resistance of Composite Deck Slabs" *Journal of The Institution of Structural Engineers*, Vol. 66, No. 16, pp. 253-267.
- CEN, Eurocode 0, ENV 1990:2002 (2002), "Basis of Structural Design". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250, Brussels.
- CEN, Eurocode 1, ENV 1991-1-1:2002 (2002), "Actions on Structures – Part 1-1: General Actions - Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC1, Brussels.
- CEN, Eurocode 1, ENV 1991-1-2:2002 (2002), "Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC1, Brussels.
- CEN, Eurocode 3, ENV 1993-1-2:2005 (2005), "Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250, Brussels.
- CEN, Eurocode 3, ENV 1993-1-3:2006 (2006), "Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250, Brussels.
- CEN, Eurocode 4, ENV 1994-1-2:2005 (2005), "Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC4, Brussels.
- CEN, Eurocode 4, ENV 1994-1-2:2005 (2005), "Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: Annex D – Model for the Calculation of the Fire Resistance of Unprotected Composite Slabs Exposed to Fire beneath the Slab according to the Standard Temperature-Time Curve". European Committee for Standardisation, Document CEN/TC 250/SC4, Brussels.
- Franssen, J. M., Vila Real, P. (2010) "Fire Design of Steel Structures". Ernst & Sohn, Berlin.
- Guo, S., Bailey, C. G. (2010). "Experimental Behaviour of Composite Slabs during the Heating and Cooling Fire Stages" *Engineering Structures* 33 (2011), pp. 563-571.

- Hamerlinck, R., Twilt, L. (1995). "Fire Resistance of Composite Slabs" *Journal of Constructional Steel Research* 33 (1995), pp. 71-85.
- Huang, Z. (2010). "The Behaviour of Reinforced Concrete Slabs in Fire" *Fire Safety Journal* 45 (2010), pp. 271-282.
- Johnson, R. P. (2004) "Composite Structures of Steel and Concrete – Beams, slabs, columns, and frames for building" Blackwell Publishing, Oxford.
- Johnson, R. P., Anderson, D. (2004) "Designers' Guide to EN 1994-1-1 Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings". Thomas Telford, London.
- Johnson, R. P., Shepherd, A. J. (2012). "Resistance to Longitudinal Shear of Composite Slabs with Longitudinal Reinforcement" *Journal of Constructional Steel Research* 82 (2013), pp. 190-194.
- Kim, H. Y., Jeong, Y. J. (2009). "Ultimate Strength of a Steel-Concrete Composite Bridge Deck Slab with Profiled Sheeting" *Engineering Structures* 32 (2010), pp. 534-546.
- Narayanan, R. (1988) "Steel-Concrete Composite Structures – Stability and Strength". Elsevier Applied Science, England.
- Oehlers, D. J., Bradford, M. A. (1995) "Composite Steel and Concrete Structural Members – Fundamental Behaviour" Elsevier Science Ltd, Oxford.
- Petterson, O., Magnusson, S. E., Thor, J. (1976) "Fire Engineering Design of Steel Structures". Publicação 50, Swedish Institute of Steel Construction.
- RJSCIE – "Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios", aprovado pelo Decreto-Lei n.º 220/2008 de 12/11, com nova redacção dada pelo Decreto-Lei n.º 224/2015 de 09/10.
- RTSCIE – "Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios", aprovado pela Portaria n.º 1532/2008.
- Santiago, A. (2015). "Estruturas Metálicas II – Aula de fogo". Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Novembro 2015, Coimbra.
- Vila Real, P. (2003) "Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural". Edições Orion, Lisboa.
- Vila Real, P., et al. (2012) "Ações de Membrana em Estruturas Mistas em Situações de Incêndio – Manual de Dimensionamento". Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Wald, F., et al. (2006). "Experimental Behaviour of a Steel Structure under Natural Fire" *Fire Safety Journal* 41 (2006), pp. 509-522.
- Wald, F., et al. (2008). "Temperatures during Fire Tests on Structure and its Prediction according to Eurocodes" *Fire Safety Journal* 44 (2009), pp. 135-146.
- Wang, Y. C. (2002) "Steel and Composite Structures – Behaviour and Design for Fire Safety". Spon Press, London.

- ALIBABA@ (2016). <https://portuguese.alibaba.com/product-gs/rockwool-fireproof-insulation-roof-panel-fireproof-glass-wool-insulation-rock-wool-acoustic-wall-panel-60174560083.html>, data da consulta: 16/05/2016.
- CIN-PROTECTIVE@ (2016). <http://www.cin-protective.com/>, data da consulta: 16/05/2016.
- JARDISEN@ (2016). <http://www.jardisen.cl/parts/vermic.htm>, data da consulta: 16/05/2016.
- LEROYMERLIN@ (2016). [http://www.leroymerlin.com.br/argila-expandida-20kg\\_87328570](http://www.leroymerlin.com.br/argila-expandida-20kg_87328570), data da consulta: 16/05/2016.