



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

PAVIMENTOS DE LAJES MISTAS DE AÇO-BETÃO

Aspetos relativos à segurança estrutural

PROJETO P21 "COMPAV"

Lisboa • junho 2021

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 217/2021 – DED/NEG

Título

PAVIMENTOS DE LAJES MISTAS DE AÇO-BETÃO

Aspetos relativos à segurança estrutural

Autoria

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS

Manuel Francisco Camacho Baião

Investigador Principal, Núcleo de Economia, Gestão e Tecnologia da Construção

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 217/2021

Proc. 0805/1102/20377

PAVIMENTOS DE LAJES MISTAS DE AÇO-BETÃO

Aspetos relativos à segurança estrutural

Resumo

Este relatório, constituindo uma parte de um trabalho mais alargado relativo ao comportamento global de pavimentos de lajes mistas de aço-betão, inclui aspetos particulares do método de cálculo exposto no Eurocódigo 4 relativo ao funcionamento das lajes mistas em fase de serviço (fase mista) e no Eurocódigo 3 relativo ao funcionamento das chapas perfiladas em fase de construção ou em fase de cofragem. Referem-se em particular os aspetos da análise numérica que é necessário realizar a fim de determinar as características mecânicas das lajes mistas de aço-betão, com base nas quais é possível verificar a sua segurança estrutural em relação aos estados limites últimos (ELU) e aos estados limites de utilização ou de serviço (ELS), quer na fase de construção (FC) quer na fase de serviço ou mista (FM) dessas lajes.

Nos capítulos que se seguem é efetuada uma descrição das lajes no que se refere à sua geometria, aos elementos constituintes e ao campo de aplicação (capítulo 2), são apresentados os critérios adotados na determinação das características mecânicas das lajes e na verificação da segurança estrutural nas duas fases referidas (capítulo 3) e, a concluir, fazem-se algumas considerações sobre o prosseguimento do trabalho (capítulo 4).

Palavras-chave: Lajes mistas / Chapas perfiladas / Características mecânicas / Segurança estrutural

STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLABS

Aspects related to structural safety

Abstract

This report, as part of a broader work on the global behavior of steel-concrete composite slabs, includes particular aspects of the calculation method set out in Eurocode 4 regarding the performance of composite slabs in the service phase (mixed phase) and Eurocode 3 on the performance of profiled sheets in the construction or formwork phase. They refer in particular to the aspects of the numerical analysis that must be carried out in order to determine the mechanical characteristics of composite steel-concrete slabs, on the basis of which it is possible to verify their structural safety in relation to the ultimate limit states (ULS) and use or service limit states (SLS), either in the construction phase or in the service or mixed phase of these slabs.

In the following chapters, a description of the slabs is made with regard to their geometry, constitutive elements and scope (chapter 2), the criteria adopted in determining the mechanical characteristics of the slabs and in verifying the structural safety, in the two referred phases, are presented (chapter 3) and, finally, some considerations are made about the follow-up of the work (chapter 4).

Keywords: Composite slabs / Profiled sheets / Mechanical characteristics / Structural safety

Índice

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Descrição das lajes | 3 |
| 2.1 | Descrição geral | 3 |
| 2.2 | Características dos elementos constituintes | 4 |
| 2.2.1 | Chapas perfiladas | 4 |
| 2.2.2 | Camada de betão | 6 |
| 2.2.3 | Armaduras | 7 |
| 2.2.4 | Fixações e conectores | 10 |
| 2.3 | Campo de aplicação | 10 |
| 3 | Características mecânicas das lajes | 11 |
| 3.1 | Cálculo segundo o EC4 | 11 |
| 3.2 | Cálculo das lajes em fase de construção (FC) | 12 |
| 3.2.1 | Condições gerais a satisfazer | 12 |
| 3.2.2 | Ações | 12 |
| 3.2.3 | Análise dos esforços atuantes | 13 |
| 3.2.4 | Verificação em relação aos estados limites últimos (ELU) | 14 |
| 3.2.5 | Verificação em relação ao estado limite de utilização/serviço (ELS) | 18 |
| 3.3 | Análise das lajes em fase mista (FM) | 19 |
| 3.3.1 | Condições gerais a considerar | 19 |
| 3.3.2 | Ações | 19 |
| 3.3.3 | Análise dos esforços | 20 |
| 3.3.4 | Verificação em relação aos estados limites últimos (ELU) | 21 |
| 3.3.5 | Verificação em relação aos estados limites de utilização/serviço (ELS) | 32 |
| 4 | Considerações finais | 36 |
| | Referências bibliográficas | 38 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Perspetiva de pavimento de laje mista de aço-betão | 3 |
| Figura 2.2 – Configurações de chapas perfiladas de lajes mistas: (a) perfil reentrante; (b) perfil trapezoidal; (c) perfil ómega | 4 |
| Figura 2.3 – Geometria de uma chapa perfilada trapezoidal | 5 |
| Figura 2.4 – Ligações típicas aço-betão em lajes mistas: (a) interligação mecânica; (b) interligação por atrito; (c) amarração de extremidade com pernos de cabeça soldados através da chapa; (d) amarração de extremidade por deformação das nervuras (EC4-1-1) | 5 |
| Figura 2.5 – Dimensões das chapas perfiladas e das lajes (EC4-1-1): (a) perfil reentrante; (b) perfil trapezoidal..... | 6 |
| Figura 2.6 – Área e espaçamento da armadura de distribuição | 8 |
| Figura 2.7 – Armadura sobre os apoios intermédios | 8 |
| Figura 2.8 – Disposição da armadura adicional para momentos positivos..... | 9 |
| Figura 2.9 – Disposição da armadura para cargas concentradas | 9 |
| Figura 3.1 – Peso próprio e sobrecarga de construção sobre a chapa perfilada, na fase de construção..... | 13 |
| Figura 3.2 – Distribuição de tensões devidas a momentos fletores positivos, no caso em que o eixo neutro plástico (LN _{pl}) está localizado acima da chapa perfilada (adaptado do EC4-1-1, 9.7.2) | 24 |
| Figura 3.3 – Distribuição de tensões devidas a momentos fletores negativos (adaptado de EC4-1-1, 9.7.2) | 25 |
| Figura 3.4 – Dimensões da laje mista a considerar no cálculo do esforço transversal resistente | 28 |
| Figura 3.5 – Perímetro crítico de punçoamento (EC4-1-1, Figura 9.8)..... | 29 |
| Figura 3.6 – Distribuição das cargas concentradas | 30 |
| Figura 3.7 – Posição do eixo neutro (LN _e) da secção mista não fendilhada sujeita a momento fletor positivo | 34 |
| Figura 3.8 – Posição do eixo neutro (LN _e) da secção mista fendilhada sujeita a momento fletor positivo | 34 |

Índice de quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 3.1 – Esforços atuantes máximos | 15 |
| Quadro 3.2 – Esforços atuantes máximos a considerar na laje em fase mista | 22 |

1 | Introdução

No setor da construção, as técnicas e os processos construtivos têm evoluído rapidamente no sentido de serem otimizados os prazos e os custos de execução das obras, melhorando os aspetos técnicos do projeto, da execução e dos materiais.

Em particular no que se refere a elementos estruturais, técnicas e materiais de construção novos têm surgido no mercado.

Do emprego de materiais clássicos na construção de estruturas, tais como, o betão armado, o aço, a madeira e a alvenaria, o setor da construção passou a utilizar novos materiais, tais como, os materiais compósitos, o alumínio e o vidro, assim como a utilizar sistemas estruturais mistos.

O princípio destes sistemas mistos é o de associar dois ou mais materiais clássicos ou inovadores, de modo a que se possam adicionar as vantagens de cada um, permitindo a obtenção de desempenhos mais elevados do elemento final.

Estes elementos mistos podem apresentar não só características mecânicas elevadas, mas também, associando soluções construtivas adequadas, características térmicas e acústicas que permitem complementarmente a satisfação das respetivas exigências regulamentares.

Mas para além da satisfação das exigências de segurança e de conforto durante a fase de serviço, é igualmente importante que sejam garantidas a segurança e as condições de trabalho da mão-de-obra durante a fase de construção.

Do ponto de vista mecânico, a combinação mais comum é a do aço e do betão, dada a compatibilidade e a complementaridade que existe entre estes dois materiais. Efetivamente ambos os materiais apresentam coeficientes de dilatação térmica semelhantes, o aço apresenta características de resistência mecânicas à tração e de ductilidade e o betão apresenta boas características de resistência e de rigidez à compressão, permitindo ainda proteção das armaduras contra a corrosão e proteção térmica das mesmas em caso de incêndio.

As estruturas mistas de aço-betão correspondem a uma combinação entre um perfil de aço e uma secção de betão armado, quer o perfil de aço seja laminado a quente, como no caso de vigas e pilares mistos, quer seja uma chapa de aço enformada a frio, como no caso das lajes mistas.

A construção de elementos mistos de aço-betão tem-se mostrado competitiva tanto no caso de construção nova como no caso de intervenções de reabilitação.

Este relatório, constituindo uma parte de um trabalho mais alargado relativo ao comportamento global de pavimentos de lajes mistas de aço-betão, inclui aspetos particulares do método de cálculo exposto no Eurocódigo 4 relativo ao funcionamento das lajes mistas em fase de serviço (fase mista) e no Eurocódigo 3 relativo ao funcionamento das chapas perfiladas em fase de construção ou fase de cofragem.

Referem-se em particular os aspetos da análise numérica que é necessário realizar a fim de determinar as características mecânicas das lajes mistas de aço-betão, com base nas quais é possível verificar a sua segurança estrutural em relação aos estados limites últimos (ELU) e aos estados limites de utilização ou de serviço (ELS), quer na fase de construção ou de cofragem (FC) quer na fase de serviço ou mista (FM) dessas lajes.

Nos capítulos que se seguem é efetuada uma descrição das lajes no que se refere à sua geometria, aos elementos constituintes e ao campo de aplicação (capítulo 2), são apresentados os critérios adotados na determinação das características mecânicas das lajes e na verificação da segurança estrutural nas duas fases referidas (capítulo 3) e, a concluir, fazem-se algumas considerações sobre o prosseguimento do trabalho (capítulo 4).

2 | Descrição das lajes

2.1 Descrição geral

As lajes mistas de aço-betão são constituídas por chapas perfiladas de aço, enformadas a frio, as quais recebem em obra uma camada de betão armado, que, em conjunto com essas chapas perfiladas garante, em fase de serviço, o funcionamento estrutural dessas lajes (Figura 2.1). Em fase de execução das lajes, as chapas perfiladas funcionam como cofragem.

O seu funcionamento estrutural é comparável ao de lajes aligeiradas unidireccionais, sendo necessário, para que tal semelhança se verifique, que estejam estabelecidos os mecanismos de ligação adequados entre a camada de betão e as chapas perfiladas.

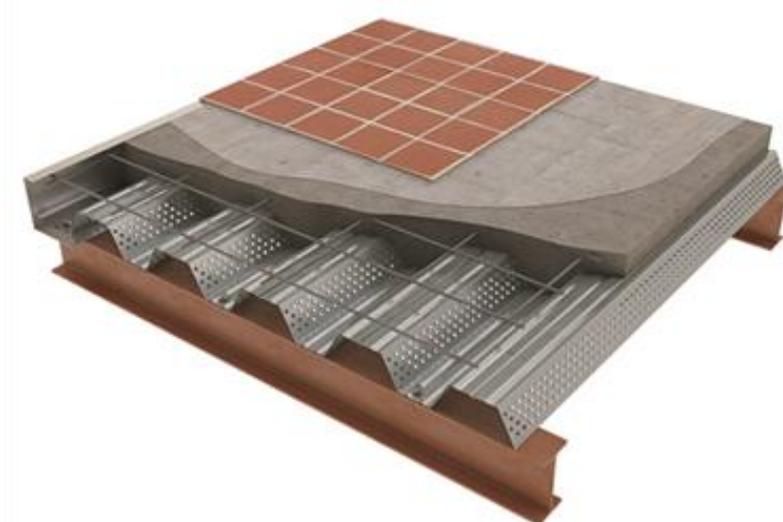


Figura 2.1 – Perspetiva de pavimento de laje mista de aço-betão

As lajes mistas de aço-betão estão apoiadas normalmente numa estrutura de vigas metálicas. Para isso é necessária uma ligação adequada entre as lajes mistas e as vigas metálicas que impeça os deslocamentos relativos entre estes elementos. Ao ligarem-se as lajes mistas de aço-betão com as vigas com a utilização de conectores, o conjunto resultante constitui uma laje mista de aço-betão com vigas mistas também de aço-betão.

Os elementos que constituem os pavimentos de lajes mistas compreendem os que integram a laje e os revestimentos de piso e de teto. A laje é composta por chapas perfiladas, betão e armaduras.

2.2 Características dos elementos constituintes

2.2.1 Chapas perfiladas

2.2.1.1 Características geométricas e dimensionais

Pelas funções que desempenham as chapas perfiladas constituem um elemento fundamental na laje. Existe uma grande variedade de geometrias de chapas perfiladas utilizadas em lajes mistas, as quais se diferenciam pela configuração e pelas dimensões das nervuras (altura, largura e espaçamento das nervuras), pela geometria dos rigidificadores das partes planas das chapas, pela forma das indentações ou dos ressaltos que permitem a conexão mecânica entre a chapa e o betão, e ainda pelo sistema adotado na sobreposição lateral das chapas.

No que se refere à configuração das nervuras das chapas, existem três tipos de perfis: os perfis reentrantes; os perfis trapezoidais; e os perfis ómega (Figura 2.2). Existem também os perfis de grande altura, embora não sejam muito utilizados e não constam do Eurocódigo 4.

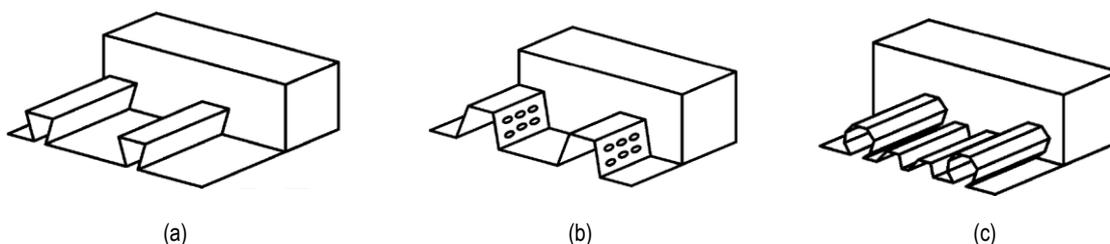


Figura 2.2 – Configurações de chapas perfiladas de lajes mistas: (a) perfil reentrante; (b) perfil trapezoidal; (c) perfil ómega

Apresenta-se na Figura 2.3 a geometria de uma chapa perfilada trapezoidal. As chapas denominam-se em geral pela sua referência comercial, pela altura da nervura, pela sua largura útil ou pelo espaçamento entre nervuras. Em geral, estas dimensões são as seguintes:

- A altura das nervuras (h_p) varia entre 40 e 80 mm;
- A largura útil das chapas (l) varia entre 700 e 900 mm;
- O espaçamento entre nervuras (b_s) situa-se entre 150 e 300 mm;
- A espessura (e) pode variar entre 0,70 e 1,50 mm. O Eurocódigo 4 estabelece como espessura mínima o valor de 0,70 mm.

As indentações ou os ressaltos são os elementos que permitem a conexão mecânica entre a chapa e a camada de betão. A quantidade e a conformação das indentações ou dos ressaltos serão as necessárias para assegurar a resistência aos esforços de corte rasante que se geram na interface entre a chapa e a camada de betão.

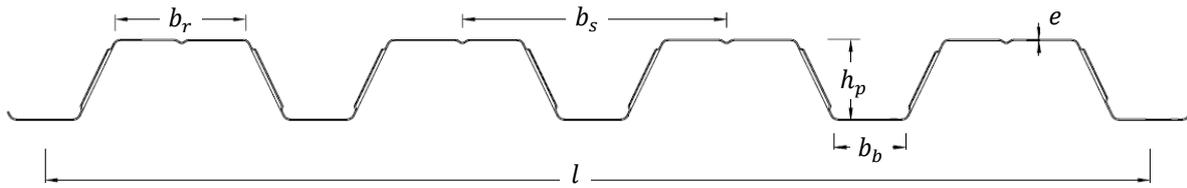


Figura 2.3 – Geometria de uma chapa perfilada trapezoidal

As indentações (ou os ressaltos) podem dispor-se nos banzos (superior ou inferior) e nas almas das nervuras e são aspetos determinantes, a dimensão, o número, a posição, o comprimento e a orientação das mesmas.

Não é possível determinar numericamente a capacidade resistente aos esforços de corte rasante proporcionado pelas características das indentações, pelo que essa capacidade resistente é determinada através de ensaios.

No Anexo B do Eurocódigo 4, indicam-se a título informativo os procedimentos de ensaio para a obtenção dos parâmetros m e k (ver mais adiante em 3.3.4.2-ii) e a determinação da resistência de cálculo ao corte longitudinal.

Para que a chapa funcione como armadura da secção composta esta deve ser capaz de transmitir esforços de corte longitudinal na interface com o betão. Esta ligação aço-betão é assegurada por diferentes mecanismos, de acordo com o EC4 (Figura 2.4):

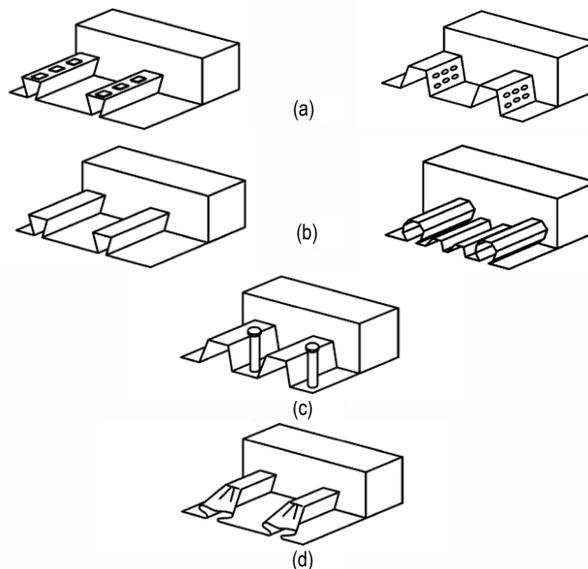


Figura 2.4 – Ligações típicas aço-betão em lajes mistas: (a) interligação mecânica;
(b) interligação por atrito; (c) amarração de extremidade com pernos de cabeça soldados através da chapa;
(d) amarração de extremidade por deformação das nervuras (EC4-1-1)

2.2.1.2 Características mecânicas do aço e características da proteção da chapa

As chapas perfiladas são produzidas a partir de bobinas de chapas planas de aço galvanizadas com 1,0 m ou mais de largura, em que o aço das chapas, usualmente tem uma tensão limite convencional

de proporcionalidade, $R_{p0,2}$, entre 320 e 350 MPa, correspondente às classes S320 GD+Z e S350 GD+Z, respetivamente, de acordo com a norma NP EN 10346:2016. Cada face é protegida contra a corrosão por uma camada de zinco do tipo Z275, com uma espessura aproximada de 0,02 mm (galvanização a quente).

2.2.2 Camada de betão

A espessura da camada de betão depende de:

- Vão e tipo de apoio das lajes;
- Sobrecarga de utilização;
- Requisitos específicos do projeto;
- Resistência ao fogo da laje.

De acordo com o Eurocódigo 4, são as seguintes as dimensões mínimas que devem ser consideradas no projeto de lajes mistas (Figura 2.5):

- A altura total da laje mista deverá ser $h \geq 80 \text{ mm}$ e a espessura da camada de betão sobre as nervuras deverá ser $h_c \geq 40 \text{ mm}$;
- Se a laje faz parte de uma viga mista ou é utilizada como diafragma, a sua altura total deverá ser $h \geq 90 \text{ mm}$ e a espessura da camada de betão sobre as nervuras deverá ser $h_c \geq 50 \text{ mm}$;

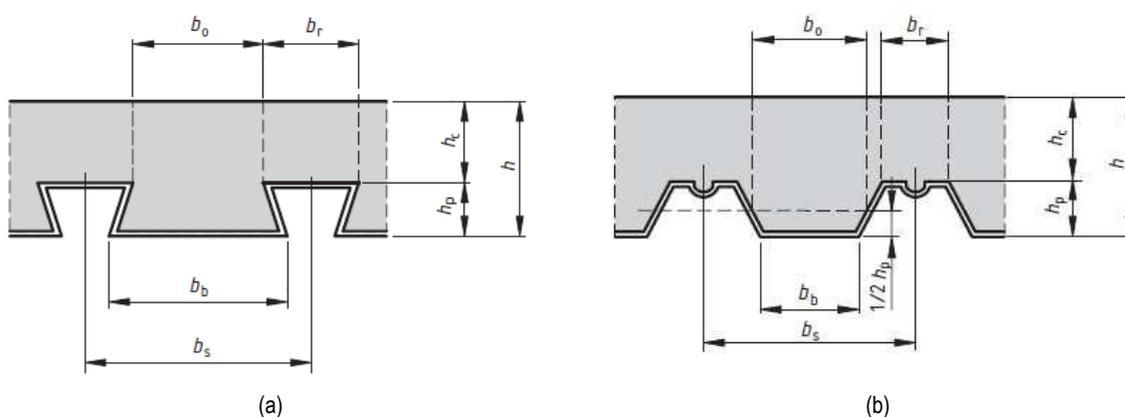


Figura 2.5 – Dimensões das chapas perfiladas e das lajes (EC4-1-1): (a) perfil reentrante; (b) perfil trapezoidal

De acordo com EC4-1-1, 3.1(1), salvo indicação em contrário no próprio Eurocódigo 4, as propriedades do betão deverão ser obtidas por referência ao EC2-1-1, 3.1, para o betão de massa volúmica normal, e ao EC2-1-1, 11.3, para o betão leve, e, de acordo com EC4-1-1, 3.1(2), não estão abrangidos no projeto de estruturas mistas, betões de classes de resistência inferiores a C20/25 e a LC20/22 e superiores a C60/75 e a LC60/66, sendo estes limites inferior e superior estabelecidos respetivamente para betões de massa volúmica normal e betões leves.

Os betões mais usuais nestas lajes são betões das classes de resistência C20/25, C25/30 e C30/37.

A consistência do betão fresco e a máxima dimensão dos agregados devem permitir o preenchimento fácil e completo dos espaços entre as chapas e as armaduras e entre as armaduras, devendo cumprir-se, relativamente à dimensão dos agregados, o prescrito em EC4-1-1, 9.2.2, ou seja, a dimensão nominal dos agregados, dependendo da menor dimensão do elemento estrutural em que o betão é colocado, não deve exceder o menor dos seguintes valores:

- a) $0,40 h_c$ (ver Figura 2.5);
- b) $b_0/3$, em que b_0 é a largura média das nervuras (largura mínima para perfis reentrantes), (ver Figura 2.5);
- c) 31,5 mm (peneiro C 31,5).

2.2.3 Armaduras

2.2.3.1 Tipos de armaduras

São ainda elementos constituintes destas lajes as armaduras integradas na camada de betão referida em 2.2.2.

As armaduras são de quatro tipos:

- i) armadura de distribuição (em rede electrossoldada ou em varão de aço);
- ii) armadura para momentos negativos sobre apoios de continuidade (em varão de aço);
- iii) armadura para reforço de momentos positivos nas zonas de vão das lajes (em varão de aço);
- iv) armadura para cargas concentradas pontuais ou lineares (em rede electrossoldada ou em varão de aço).

As redes electrossoldadas de aço devem ser do tipo A500 ER e satisfazer os requisitos da Especificação LNEC E 458.

Os varões de aço devem ser dos tipos A500 NR ou A500 ER e satisfazer os requisitos das Especificações LNEC E 450 e E456, respetivamente.

As redes electrossoldadas e os varões de aço para utilização em armaduras para betão armado, de acordo com o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, têm de dispor de Documento de Classificação, emitido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil e, de acordo com o Decreto-Lei n.º 390/2007, de 10 de setembro, têm de dispor de certificação da conformidade com as referidas especificações, emitida por organismo acreditado pela entidade competente no domínio da acreditação em conformidade com as metodologias do Sistema Português da Qualidade.

2.2.3.2 Armadura de distribuição

A armadura de distribuição tem como função a resistência aos esforços de tração devidos às cargas pontuais de valor reduzido e à retração e devem satisfazer às seguintes condições:

- coloca-se a uma distância da face superior das lajes de modo a garantir um recobrimento não inferior a 20 mm;

- a área da armadura de distribuição, nas duas direções, de acordo com a secção 9.2.1 da norma NP EN 1994-1-1, não deve ser inferior a $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ e deve ser colocada na espessura da lajeta de betão (h_c), não devendo o espaçamento dos varões exceder o menor dos valores $2h$ e 350 mm (Figura 2.6). Nas regiões de maior sismicidade recomenda-se que a armadura de distribuição nas duas direções seja no mínimo de $142 \text{ mm}^2/\text{m}$, com amarração adequada para permitir o funcionamento em diafragma da laje.

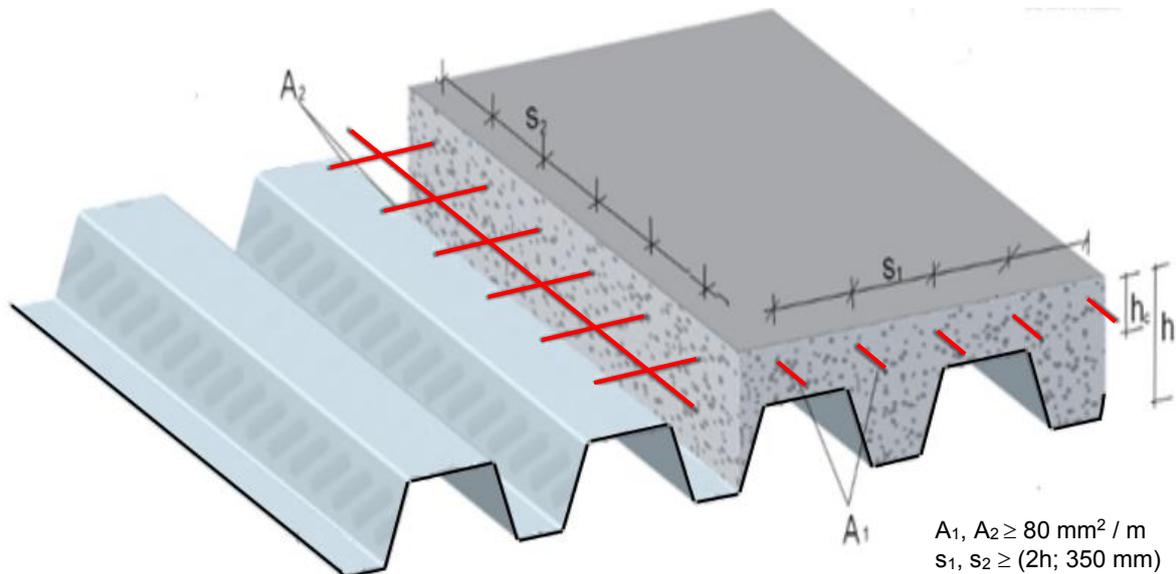


Figura 2.6 – Área e espaçamento da armadura de distribuição

2.2.3.3 Armadura nos apoios

Nas lajes contínuas é necessário colocar, na zona dos apoios intermédios, armadura para resistir aos momentos negativos. Esta armadura deve ser determinada efetuando a verificação da segurança quer em relação aos estados limites últimos quer em relação ao estado limite de utilização, neste caso de fendilhação (respetivamente, secção 9.7.2 (7) e secção 9.8.1 da NP EN 1994-1-1:2011), e deve ser constituída por varões com um afastamento não superior a $2h$ ou 350 mm e um comprimento não inferior a $1/3$ do vão correspondente (Figura 2.7).

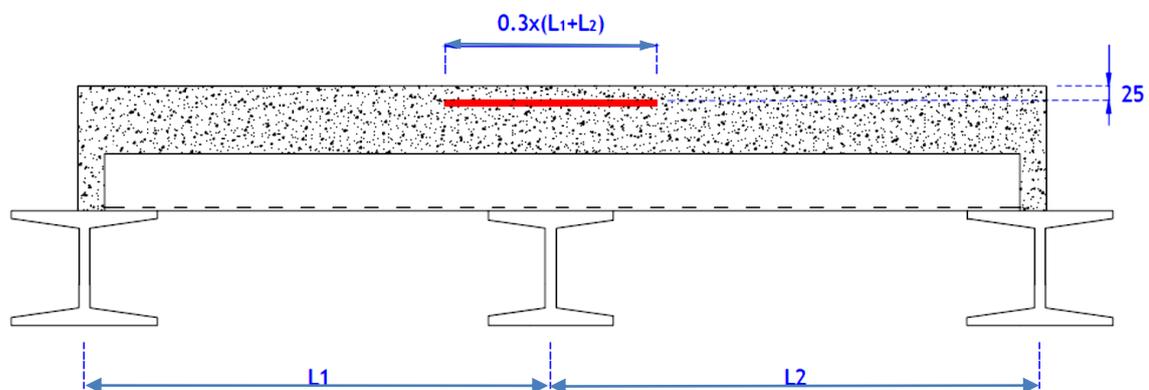


Figura 2.7 – Armadura sobre os apoios intermédios

2.2.3.4 Armadura adicional

Para garantir capacidade resistente adicional das lajes mistas aos esforços de flexão, coloca-se armadura adicional, constituída por varões de aço no interior das nervuras dessas lajes. Esta armadura também serve para aumentar a resistência ao fogo dessas lajes, uma vez que, em caso de incêndio, a contribuição das chapas perfiladas diminui com o aumento da temperatura que se pode verificar nessas chapas (Figura 2.8).

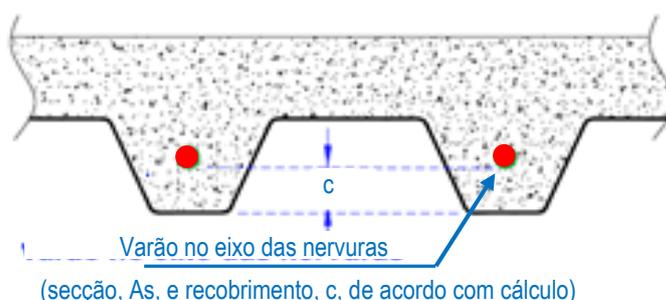


Figura 2.8 – Disposição da armadura adicional para momentos positivos

2.2.3.5 Armadura transversal para cargas concentradas pontuais e lineares

Na secção 9.4.3 da norma NP EN 1994-1-1:2011 são apresentados os critérios relativos às larguras efetivas a considerar na determinação dos esforços resistentes e da armadura a adotar, no caso da atuação de cargas concentradas pontuais ou lineares sobre a laje.

De acordo com a mesma secção, poderá utilizar-se uma armadura transversal nominal não calculada se o valor característico das sobrecargas não exceder os seguintes valores:

- Carga concentrada: 7,5 kN;
- Cargas distribuídas: 5,0 kN/m².

Esta armadura transversal nominal deve ter uma secção transversal com uma área não inferior a 0,2% da área do betão localizado acima das nervuras, A_c , e deve dispor-se numa largura não inferior a b_{em} , como calculada na mesma secção, a que acresce o comprimento de amarração contado para além desta largura (Figura 2.9).

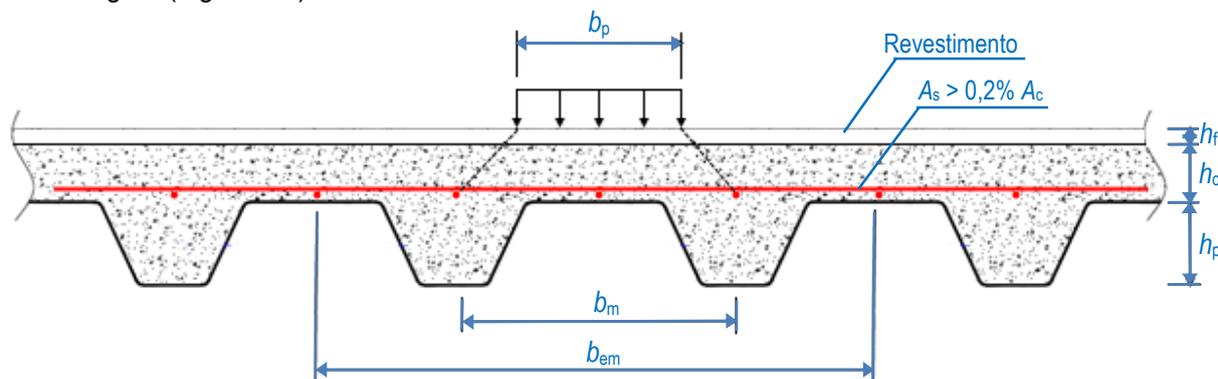


Figura 2.9 – Disposição da armadura para cargas concentradas

2.2.4 Fixações e conectores

As chapas devem ser fixadas à estrutura de suporte, a fim de que elas não se possam deslocar sob a ação do vento ou durante a betonagem.

O tipo de fixação é função dessa estrutura. Em estrutura metálica podem ser utilizados pregos por disparo ou parafusos auto-roscentes ou auto-perfurantes. Em estruturas de betão podem ser utilizadas chapas de aço embebidas no betão aonde se fixam as chapas perfiladas. No caso de estruturas de madeira podem ser utilizados pregos de aço de cabeça larga.

Estas fixações não são consideradas para efeitos da estabilidade ou da capacidade resistente da laje.

Para tal consideração é necessário que as ligações entre a laje mista aço-betão e a estrutura sejam adequadas, como as que se podem conseguir com conectores.

Existem dois tipos de conectores, os conectores soldados e os conectores cravados.

Nos conectores soldados, para soldar o conector através da chapa ao suporte, a parte superior da viga deve estar limpa, não pintada e seca e a chapa deve estar em contacto perfeito com as vigas.

Os conectores cravados consistem em peças metálicas em forma de "L" fixadas à viga através de pregos por disparo.

As ligações da chapa à estrutura serão tratadas noutro documento que conterà os aspetos relativos à execução das lajes mistas aço-betão (ver capítulo 4).

2.3 Campo de aplicação

O campo de aplicação das lajes mistas de aço-betão em pavimentos de edifícios abrange o seu emprego em edifícios de habitação, edifícios de escritórios, edifícios comerciais, edifícios industriais ou edifícios com utilização equivalente.

O campo de aplicação é limitado a chapas com almas pouco espaçadas. O espaçamento entre almas não deve ser superior a $b_r / b_s = 0,6$ (ver Figura 2.3).

Nas estruturas em que as ações são em larga medida repetitivas ou aplicadas bruscamente de um modo suscetível de produzir efeitos dinâmicos, deve ter-se particular cuidado na pormenorização construtiva, de modo a assegurar que a ligação necessária entre a chapa perfilada e a camada de betão não se deteriora com o tempo. Se para as referidas ações não for possível assegurar, eventualmente por verificação experimental, esta ligação, a utilização destas lajes não deve ser considerada.

A utilização destas lajes em pavimentos exteriores carece da aplicação de um revestimento de impermeabilização.

A utilização destas lajes em locais húmidos ou em ambientes agressivos apenas é possível se forem adotadas medidas de proteção adequadas na face inferior dessas lajes.

3 | Características mecânicas das lajes

3.1 Cálculo segundo o EC4

A segurança estrutural das lajes mistas de aço-betão é verificada conforme os critérios estabelecidos no Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1:2011), mais precisamente no seu capítulo 9. Tratando-se de dois materiais distintos, o betão armado e o aço, também contribuem para esta verificação os critérios estabelecidos no Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1:2010) e no Eurocódigo 3 na parte relativa a chapas enformadas a frio (NP EN 1993-1-3:2006).

A verificação da segurança deve ser efetuada tendo presente não só a fase de serviço ou fase mista das lajes (FM), mas também a fase de construção (FC) em que as chapas perfiladas funcionam como cofragem. Em cada uma destas fases deve ser verificada a segurança relativamente aos estados limites últimos e aos estados limites de utilização.

Na fase de construção ou fase de cofragem (FC), a verificação da segurança é determinante, em geral, para a avaliação da necessidade de se utilizar escoramento ou de se reduzir o vão livre das chapas utilizando vigas secundárias.

Na fase de serviço ou fase mista (FM), as chapas perfiladas funcionam como armaduras de tração inferiores do betão das lajes mistas, sendo necessário, para isso, que se estabeleça uma adequada resistência ao corte longitudinal nas superfícies de contacto entre as chapas e o betão.

Para uma determinada laje, em cada uma destas fases, a verificação da segurança estrutural faz-se efetuando a comparação entre os valores de cálculo dos efeitos (esforços e deslocamentos) devidos às combinações das ações que sobre essa laje podem ocorrer e os valores de cálculo correspondentes aos estados limites últimos (ELU) e aos estados limites de utilização (ELS) que os referidos efeitos não devem ultrapassar nas condições de funcionamento previstas.

Na verificação da segurança devem ser adotados os critérios apresentados nas disposições aplicáveis nas diferentes secções das seguintes normas portuguesas e europeias relativas ao dimensionamento estrutural (Eurocódigos):

- NP EN 1994-1-1:2011 – Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (EC4-1-1);
- NP EN 1993-1-1:2010 – Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (EC3-1-1);
- EN 1993-1-3:2006 – Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting (EC3-1-3);
- EN 1993-1-5:2006 – Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements (EC3-1-5);
- NP EN 1992-1-1:2010 – Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (EC2-1-1);

- NP EN 1991-1-1:2009 – Eurocódigo 1 - Ações em estruturas. Parte 1-1: Ações gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios (EC1-1-1);
- EN 1991-1-6:2005 – Eurocode 1 - Actions on structures. Part 1-6: General actions – Actions during execution (EC1-1-6);
- NP EN 1990:2009 – Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas (EC0).

Apresentam-se de seguida os critérios em que se devem basear as análises a efetuar na verificação da segurança estrutural das lajes, em cada uma das fases referidas.

3.2 Cálculo das lajes em fase de construção (FC)

3.2.1 Condições gerais a satisfazer

Nesta fase, as chapas perfiladas, funcionando como plataforma de trabalho e como cofragem do betão a colocar, não devem ultrapassar, face às ações que sobre elas podem ocorrer, determinados estados de tensão e de deformação.

A verificação da segurança das chapas de aço perfiladas utilizadas como cofragem é efetuada de acordo com o Eurocódigo EC4-1-1, que remete para os critérios de cálculo estabelecidos no Eurocódigo EC3-1-3.

De acordo com o EC4-1-1, deverá ter-se em devida conta, na determinação dos valores das resistências correspondentes aos diversos estados limites, o efeito das bossas ou dos recortes e a encurvadura das partes das chapas sujeitas a tensões de compressão.

Para a verificação da segurança das chapas de aço perfiladas utilizadas como cofragem têm-se em conta as especificações gerais estabelecidas relativamente: (i) às ações, em EC4-1-1, 9.3.2; (ii) à análise dos esforços, em EC4-1-1, 9.4.1; (iii) aos estados limites últimos, em EC4-1-1, 9.5; e (iv) aos estados limites de utilização, em EC4-1-1, 9.6.

3.2.2 Ações

De acordo com EC4-1-1, 9.3.2, devem ser tidas em conta as seguintes cargas no cálculo das chapas usadas como cofragem:

- peso próprio da chapa perfilada;
- peso do betão fresco e da armadura;
- cargas de construção, incluindo a acumulação local de betão, durante a construção, de acordo com o EC1-1-6, 4.11.1 e 4.11.2;
- eventuais cargas de armazenamento;
- efeito de “poça” (aumento da espessura de betão devido à deformação das chapas). Esse efeito apenas deverá ser considerado se a flecha central (δ) das chapas sob o seu peso próprio, acrescido do peso de betão fresco, calculada no estado limite de utilização for superior ou igual a 1/10 da espessura da laje. Poderá admitir-se no cálculo que o acréscimo da espessura nominal do betão ao longo de todo o tramo é de $0,7\delta$.

De acordo com o EC1-1-1, Anexo A - Quadro A.1, o peso volúmico do betão endurecido é de 24 kN/m^3 . Este valor deve ser aumentado de 1 kN/m^3 , para considerar o peso da armadura em percentagens normais de aço, a que se acresce ainda o valor de 1 kN/m^3 para o caso de betão fresco. Sendo assim, o valor nominal do peso volúmico do betão armado a considerar na verificação da segurança das chapas perfiladas é de 26 kN/m^3 . Este valor corresponde a uma majoração do peso volúmico do betão endurecido armado de 4%.

De acordo com o EC1-1-6, 4.11.1(2), deve ser utilizada uma sobrecarga uniformemente distribuída de 1 kN/m^2 , representando o peso dos operários e de pequeno equipamento (Q_{ca}).

De acordo com o EC1-1-6, 4.11.2(1), durante a fase de betonagem, em adição ao peso próprio, devem ser utilizadas, fora da zona de betonagem, uma sobrecarga uniformemente distribuída de $0,75 \text{ kN/m}^2$ e, na zona de trabalho de $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (ou o comprimento do vão, se este for inferior), uma sobrecarga uniformemente distribuída com o valor igual a 10% do peso próprio da laje mista, mas nunca inferior a $0,75 \text{ kN/m}^2$ nem superior a $1,50 \text{ kN/m}^2$ (ver Figura 3.1). Admite-se que a sobrecarga Q_{ca} , atrás referida, representando o peso dos operários e de pequeno equipamento, poderá estar incluída nestas sobrecargas ou, em alternativa, poderá acrescer a estas sobrecargas, dependendo do processo de construção (JONHSON, 2012).

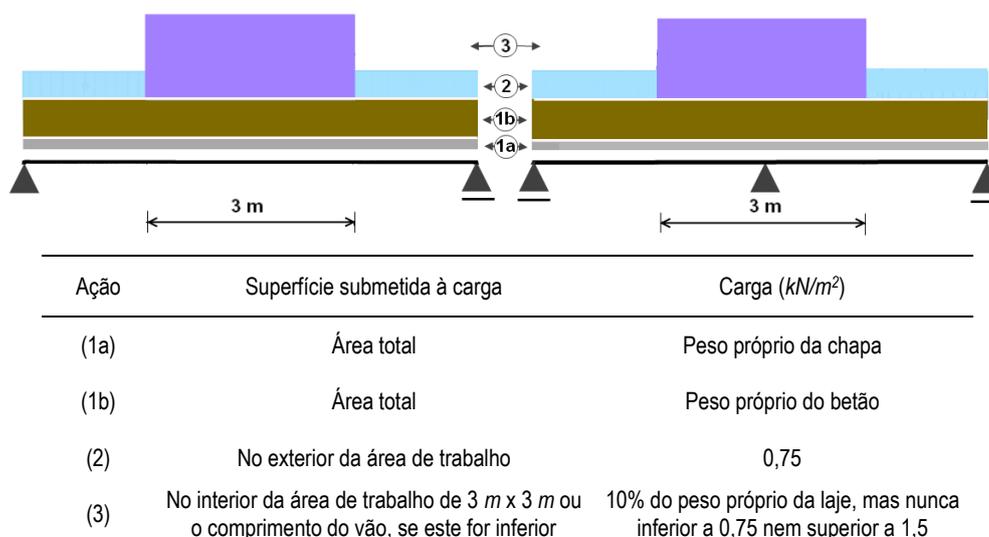


Figura 3.1 – Peso próprio e sobrecarga de construção sobre a chapa perfilada, na fase de construção

3.2.3 Análise dos esforços atuantes

De acordo com o EC4-1-1, 9.4.1, o cálculo das chapas perfiladas utilizadas como cofragem deverão estar conformes com o EC3-1-3, sendo que a redistribuição plástica dos momentos não é permitida no caso de utilização de escoramento provisório.

3.2.4 Verificação em relação aos estados limites últimos (ELU)

3.2.4.1 Esforços atuantes

A combinação de ações a utilizar para a determinação dos esforços atuantes máximos (momento fletor positivo, momento fletor negativo e esforço transversal) é a seguinte:

$$P_{Sd} = \gamma_G G'_k + \gamma_Q Q_k \quad (3.1)$$

em que:

P_{Sd} : carga total (peso próprio e sobrecarga de construção);

G'_k : valor característico da carga permanente (peso da chapa e do betão fresco);

Q_k : valor característico da sobrecarga;

$\gamma_G = 1,35$: coeficiente parcial relativo às ações permanentes;

$\gamma_Q = 1,5$: coeficiente parcial relativo à sobrecarga de construção.

Admitindo não só as duas situações de funcionamento, chapa com um tramo simplesmente apoiado e chapa com dois ou mais tramos contínuos, incluindo nesta última situação a consideração de escoramento intermédio dos vãos, mas também as combinações fundamentais de ações mais desfavoráveis, os momentos flectores atuantes máximos (positivos e negativos) e os esforços transversos atuantes máximos são obtidos, respetivamente, pelas expressões seguintes:

$$M_{Ed} = k_m P_{Sd} \cdot L^2 \quad (3.2)$$

$$V_{Ed} = k_v P_{Sd} \cdot L \quad (3.3)$$

em que:

$k_m = 0,125$ e $k_v = 0,5$: coeficientes para chapas com um tramo simplesmente apoiado;

$k_m = 0,096$: coeficiente para chapas com dois tramos contínuos iguais (na zona do vão);

$k_m = -0,125$ e $k_v = 0,625$: coeficientes para chapas com dois tramos contínuos iguais (na zona do apoio de continuidade);

$k_m = 0,10$: coeficiente para chapas com quatro tramos iguais (na zona do vão do tramo extremo);

$k_m = -0,121$ e $k_v = 0,607$: coeficientes para chapas com quatro tramos contínuos iguais (na zona do apoio de continuidade).

No Quadro 3.1 ilustram-se as situações a que correspondem cada um destes coeficientes.

Quadro 3.1 – Esforços atuantes máximos

| N.º tramos | Esforço atuante máximo | Esquema de carregamento (*) | Diagrama de esforços | Valor de cálculo |
|------------|--|-----------------------------|----------------------|--|
| 1 | Momento fletor positivo | | | $M_{Sd}^+ = 0,125 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Esforço transverso | | | $V_{Sd} = 0,50 \times P_{sd} \times L$ |
| 2 | Momento fletor positivo no vão | | | $M_{Sd}^+ = 0,096 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Momento fletor negativo no apoio | | | $M_{Sd}^- = -0,125 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Esforço transverso no apoio extremo | | | $V_{Sd} = 0,4375 \times P_{sd} \times L$ |
| | Esforço transverso no apoio intermédio | | | $V_{Sd} = 0,625 \times P_{sd} \times L$ $V_{Sd \text{ ext}} = 0,375 \times P_{sd} \times L$ |
| 4 | Momento fletor positivo | | | $M_{Sd}^+ = 0,100 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Momento fletor negativo | | | $M_{Sd}^- = -0,121 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Esforço transverso | | | $V_{Sd} = 0,607 \times P_{sd} \times L$ $V_{Sd \text{ ext}} = 0,393 \times P_{sd} \times L$ |

Notas:

▲ - apoio definitivo da chapa (viga, p.e.); T - apoio definitivo ou temporário (escoramento) da chapa

(*) Por facilidade de cálculo, dado o reduzido peso da chapa, considera-se em todos os casos este peso associado ao peso do betão.

3.2.4.2 Esforços resistentes

De acordo com o EC4-1-1, 9.5, a verificação das chapas perfiladas em relação aos estados limites últimos (ELU) deve ser efetuada de acordo com o EC3-1-3, tendo em devida conta, nas resistências de cálculo, o efeito das bossas e dos recortes.

i) Momentos fletores resistentes

De acordo com o EC3-1-3, 6.1.4.1, o valor de cálculo do momento fletor resistente é dado pela expressão:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{ef,min} f_{yp}}{\gamma_{M0}} \quad (3.4)$$

em que:

$W_{ef,min}$: módulo de flexão mínimo da secção transversal efetiva da chapa perfilada;

f_{yp} : tensão limite convencional de proporcionalidade do aço da chapa perfilada;

$\gamma_{M0} = 1,00$: coeficiente parcial relativo ao aço da chapa.

ii) Esforço transversal resistente

De acordo com o EC3-1-3, 6.1.5, o valor de cálculo do esforço transversal resistente é dado pela expressão:

$$V_{b,Rd} = \frac{h_w}{\sin \varnothing} t f_{bv} \quad (3.5)$$

em que:

h_w : altura da alma do perfil, descontando a zona das bossas laterais;

\varnothing : ângulo de inclinação da alma das nervuras do perfil em relação ao banzo;

t : espessura da chapa, retirando a espessura do revestimento de proteção por zincagem;

f_{bv} : resistência ao corte da chapa, considerando a encurvadura, de acordo com o EC3-1-3, Quadro 6.1;

$\gamma_{M0} = 1,00$: coeficiente parcial relativo ao aço da chapa.

De acordo com o EC3-1-3, Quadro 6.1, a resistência ao corte, considerando a encurvadura, depende da esbelteza relativa das almas das nervuras ($\bar{\lambda}_w$) e da existência ou não de rigidificadores nos apoios. No caso de não existência desses rigidificadores tem-se:

$$f_{bv} = 0,58 f_{yb}, \quad \text{para } \bar{\lambda}_w \leq 0,83 \quad (3.6)$$

$$f_{bv} = 0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w, \quad \text{para } 0,83 < \bar{\lambda}_w \leq 1,40 \quad (3.7)$$

$$f_{bv} = 0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2, \quad \text{para } \bar{\lambda}_w \geq 1,40 \quad (3.8)$$

De acordo com o EC3-1-3, 6.1.5(2), no caso de almas sem rigidificadores horizontais, a esbelteza relativa das almas das nervuras ($\bar{\lambda}_w$) pode ser determinada pela expressão:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (3.9)$$

em que:

s_w : largura da alma das nervuras do perfil.

iii) Forças transversais locais resistentes

De acordo com o EC3-1-3, 6.1.7.3, a resistência transversal local por alma da secção transversal da chapa perfilada é dada pela expressão:

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1 \sqrt{r/t} \right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 l_a/t} \right) \left[2,4 + \left(\phi/90 \right)^2 \right] / \gamma_{M1} \quad (3.10)$$

em que:

l_a : comprimento efetivo do apoio, de acordo com a categoria relevante, referida em EC3-1-3, 6.1.7.3(3) e (4) (em mm);

f_{yb} : tensão limite convencional de proporcionalidade do aço da chapa;

E : módulo de elasticidade do aço da chapa;

$\gamma_{M1} = 1,00$: coeficiente parcial relativo ao aço da chapa;

α : coeficiente para a categoria relevante, de acordo com EC3-1-3, 6.1.7.3(3) e (5), tendo em conta que, de acordo com EC3-1-3, 6.1.7.3(1), se verificam as seguintes condições:

- $c \geq 40$ mm, distância livre (c), conforme EC3-1-3, Figura 6.9, entre o comprimento de apoio do perfil, onde se verifica a reação do suporte, e a extremidade livre do mesmo perfil, que é no mínimo de 40 mm.
- a secção transversal satisfaz aos seguintes critérios:
 $r/t \leq 10$
 $h_w/t \leq 200 \sin \phi$
 $45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

em que:

h_w : altura da alma do perfil, descontando a zona das bossas laterais;

t : espessura da chapa, retirando a espessura do revestimento de proteção por zincagem (em mm);

r : raio interno de conformação da chapa nos cantos do perfil (mm);

ϕ : ângulo de inclinação da alma das nervuras do perfil em relação ao banzo (graus).

iv) Combinação de esforço transversal e momento fletor

Se existir ação combinada de momento fletor e de esforço transversal e se o esforço transversal atuante (V_{Ed}) for superior a metade do esforço transversal resistente ($V_{w,Rd}$), de acordo com o EC3-1-3, 6.1.10 tem de se verificar a satisfação da seguinte expressão:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \times \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1 \right)^2 \leq 1,0 \quad (3.11)$$

em que:

$M_{y,Ed}$: valor de cálculo do momento fletor atuante;

$M_{y,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente, de acordo com o EC3-1-3, 6.1.4;

$V_{w,Rd}$: valor de cálculo do esforço transversal resistente, de acordo com o EC3-1-3, 6.1.5 (por alma);

$M_{f,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente plástico da secção considerando apenas a contribuição dos banzos, de acordo com o EC3-1-5;

$M_{pl,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente plástico da secção, de acordo com o EC3-1-5.

v) Combinação de força transversal local e momento fletor

Se existir ação combinada de momento fletor (M_{Ed}) e de força transversal local devido a reação do apoio (F_{Ed}), de acordo com EC3-1-3, 6.1.11 devem verificar-se as seguintes expressões:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.12)$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25 \quad (3.14)$$

em que:

$M_{c,Rd}$: valor de cálculo do momento fletor resistente, de acordo com o EC3-1-3, 6.1.4;

$R_{w,Rd}$: valor de cálculo da resistência transversal local da alma, de acordo com EC3-1-3, 6.1.7;

M_{Ed} : valor de cálculo do momento fletor atuante, que pode ser calculado no bordo do suporte;

F_{Ed} : valor de cálculo do esforço atuante.

3.2.5 Verificação em relação ao estado limite de utilização/serviço (ELS)

Deformação

De acordo com o EC4-1-1, 9.6(1), as propriedades das secções deverão ser determinadas de acordo com o EC3-1-3.

De acordo com o EC4-1-1, 9.6(2), a flecha (δ_s) das chapas perfiladas sob a ação do seu peso próprio acrescido do peso do betão fresco, excluindo as cargas de construção, não deve exceder $\delta_{s,max}$.

Admitindo as diversas situações de funcionamento, chapa com um tramo simplesmente apoiado e chapa com dois ou mais tramos contínuos, incluindo nesta última situação a consideração do escoramento intermédio dos vãos, caso exista, as flechas máximas podem ser determinadas pela expressão:

$$\delta_s = k \frac{5}{384} P_{sd} L^4 \frac{1}{E \cdot I_{ef}} \quad (3.15)$$

em que:

P_{sd} : carga de serviço (peso da chapa e peso do betão fresco);

L : vão teórico entre apoios (os escoramentos são considerados apoios);

E : módulo de elasticidade do aço da chapa;

I_{ef} : momento de inércia da secção efetiva da chapa;

$k = 1,00$: para chapas com um tramo simplesmente apoiado;

$k = 0,41$: para chapa com dois tramos iguais;

$k = 0,52$: para chapa com três tramos iguais;

$k = 0,49$: para chapa com quatro tramos iguais.

De acordo com a EC4-1-1, 9.6(2), o valor da flecha máxima admissível é:

$$\delta_{s,max} = \frac{L}{180} \quad (3.16)$$

em que:

L : vão entre apoios (considerando-se neste contexto as escoras como apoios).

3.3 Análise das lajes em fase mista (FM)

3.3.1 Condições gerais a considerar

A verificação da segurança das lajes mistas, em fase de serviço ou fase mista (FM), é efetuada de acordo com o Eurocódigo EC4-1-1, tendo em conta as especificações gerais estabelecidas relativamente: (i) às ações, em EC4-1-1, 9.3.3; (ii) à análise dos esforços, em EC4-1-1, 9.4.2; (iii) aos estados limites últimos, em EC4-1-1, 9.7; e (iv) aos estados limites de utilização, em EC4-1-1, 9.8.

De acordo com o EC4-1-1, deverá ter-se em devida conta, na determinação dos valores das resistências correspondentes aos diversos estados limites, o efeito das bossas ou dos recortes.

3.3.2 Ações

De acordo com EC4-1-1, 9.3.3(1), as cargas a considerar, em cada um dos casos de carregamento, deverão estar em conformidade com o EC1-1-1. Assim as ações a considerar são, em geral:

- peso próprio da laje (chapa de aço, betão e armaduras);
- peso das paredes divisórias, dos revestimentos de piso e de teto e outras cargas permanentes;
- reações devidas à retirada do escoramento, caso exista;
- sobrecargas de serviço e outras ações variáveis.

De acordo com EC4-1-1, 9.3.3(2), nos cálculos para a verificação da segurança em relação aos estados limites últimos poderá admitir-se que a totalidade das cargas atua na laje mista, desde que esta hipótese também seja considerada no cálculo do corte longitudinal.

3.3.3 Análise dos esforços

3.3.3.1 *Métodos de análise global na verificação em relação aos estados limites últimos*

De acordo com EC4-1-1, 9.4.2(1), para a verificação da segurança de lajes mistas em relação aos estados limites últimos, poderão utilizar-se os seguintes métodos de análise global:

- i) análise elástica linear, com ou sem redistribuição;
- ii) análise rígido-plástica, desde que se demonstre que as secções onde são necessárias rotações plásticas têm uma capacidade de rotação suficiente;
- iii) análise elasto-plástica, tendo em conta o comportamento não linear dos materiais.

No caso de ser utilizada uma análise global elástica linear, considerando as características da secção não fendilhada, poderão obter-se nos apoios intermédios momentos fletores negativos relativamente elevados, sendo necessário colocar nessas zonas uma quantidade de armadura para resistir a esses momentos que se pode considerar excessiva. Neste caso, de acordo com EC4-1-1, 9.4.2(3), os momentos fletores nos apoios intermédios podem ser reduzidos, como opção, no máximo de 30%, aumentando em consequência os momentos fletores positivos nos tramos adjacentes.

No entanto, a análise global elástica linear poderá ser efetuada considerando desde logo a fendilhação do betão nas zonas dos apoios intermédios. Neste caso utilizar-se-á um modelo de análise em que se consideram as características da secção não fendilhada para a zona dos momentos positivos e as características da secção fendilhada para a zona dos momentos negativos.

No caso de ser utilizada uma análise rígido-plástica, é necessário demonstrar que as secções onde se formam as rótulas plásticas têm suficiente capacidade de rotação. No entanto, de acordo com o EC4-1-1, 9.4.2(4), esta análise poderá ser efetuada sem qualquer verificação da capacidade de rotação destas secções, desde que se utilizem armaduras para betão armado da Classe C, de acordo com o EC2-1-1, Anexo C, e o vão não seja superior a 3,0 m.

3.3.3.2 *Método de análise global na verificação em relação aos estados limites de utilização*

De acordo com EC4-1-1, 9.4.2(2), para a verificação da segurança de lajes mistas em relação aos estados limites de utilização deverá utilizar-se a análise global elástica linear. Os efeitos da fendilhação do betão na zona dos apoios intermédios deverão ser considerados de acordo com EC4-1-1, 5.4.2.

3.3.3.3 Método de análise alternativo para lajes mistas contínuas

No que se refere a lajes mistas contínuas, que na generalidade dos casos são utilizadas, admite-se no EC4-1-1, 9.4.2(5), que a análise de uma laje contínua poderá ser efetuada como uma sucessão de tramos simplesmente apoiados. Neste caso, deverá colocar-se nos apoios intermédios uma armadura nominal de fendilhação acima das nervuras conforme o EC4-1-1, 9.8.1(2), cuja área não deverá ser inferior a 0,2% da área da secção de betão situado acima das nervuras, no caso de construção não escorada, e a 0,4% da área desta secção no caso de construção escorada, como adiante se refere.

3.3.4 Verificação em relação aos estados limites últimos (ELU)

3.3.4.1 Esforços atuantes

A combinação de ações a utilizar para a determinação dos esforços atuantes máximos (momento fletor positivo, momento fletor negativo e esforço transversal) é a seguinte:

$$P_{sd} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k \quad (3.17)$$

em que:

P_{sd} : carga total;

G_k : valor característico da carga permanente (peso próprio e restante carga permanente);

Q_k : valor característico da sobrecarga;

$\gamma_G = 1,35$: coeficiente parcial relativo às ações permanentes;

$\gamma_Q = 1,5$: coeficiente parcial relativo às ações variáveis;

Admitindo as duas condições de funcionamento, laje em vão simplesmente apoiado e laje em vãos contínuos, e considerando as combinações fundamentais de ações mais desfavoráveis, a determinação dos momentos flectores atuantes máximos (positivos e negativos) e dos esforços transversos atuantes máximos é efetuada, respetivamente, através das seguintes expressões:

- No caso de lajes de um tramo simplesmente apoiado

$$M_{Ed} = k_m P_{sd} L^2 \quad (3.18)$$

$$V_{Ed} = k_v P_{sd} L \quad (3.19)$$

em que:

$k_m = 0,125$ e $k_v = 0,5$: coeficientes para lajes com um tramo simplesmente apoiado.

- No caso de lajes de dois tramos contínuos:

$$M_{Ed} = k_{mG} \gamma_G G_k L^2 + k_{mQ} \gamma_Q G_Q L^2 \quad (3.20)$$

$$V_{Ed} = k_{vG} \gamma_G G_k L + k_{vQ} \gamma_Q G_Q L \quad (3.21)$$

em que:

$k_{mG} = 0,070$; $k_{mQ} = 0,096$: coeficiente para lajes com dois tramos contínuos iguais (na zona do vão);

$k_{mG} = -0,125$ e $k_{mQ} = -0,125$: coeficientes para lajes com dois tramos contínuos iguais (na zona do apoio de continuidade) e sobrecarga nos tramos 1 e 2;

$k_{vG} = 0,625$ e $k_{vQ} = 0,625$: coeficientes para lajes com dois tramos contínuos iguais (na zona do apoio de continuidade) e sobrecarga nos tramos 1 e 2;

$k_{vG} = 0,375$ e $k_{vQ} = 0,438$: coeficientes para lajes com dois tramos contínuos iguais (na zona do apoio de continuidade).

No Quadro 3.2 ilustram-se as situações a que correspondem cada um destes coeficientes.

Quadro 3.2 – Esforços atuantes máximos a considerar na laje em fase mista

| N.º tramos | Esforço atuante máximo | Esquema de carregamento | Diagrama de esforços | Valor de cálculo |
|------------|--|-------------------------|----------------------|--|
| 1 | Momento fletor positivo | | | $M_{Sd}^+ = 0,125 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Esforço transverso | | | $V_{Sd} = 0,50 \times P_{sd} \times L$ |
| 2 | Momento fletor positivo | | | $M_{Sd}^+ = 0,070 \times G_{sd} \times L^2 + 0,096 \times Q_{sd} \times L^2$ |
| | Momento fletor negativo | | | $M_{Sd}^- = -0,125 \times P_{sd} \times L^2$ |
| | Esforço transverso no apoio extremo | | | $V_{Sd} = 0,375 \times G_{sd} \times L + 0,438 \times Q_{sd} \times L$ |
| | Esforço transverso no apoio intermédio | | | $V_{Sd} = 0,625 \times P_{sd} \times L$ |

3.3.4.2 Esforços resistentes

A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos (ELU) é efetuada de acordo com EC4-1-1, 9.7, comparando os valores de cálculo dos esforços atuantes com os valores de cálculo dos esforços resistentes relativos aos apropriados estados limites últimos, não devendo os primeiros exceder os segundos.

Os esforços resistentes para os quais se estabelecem os respetivos estados limites são, de acordo com o EC4-1-1, 9.7, os seguintes:

- Flexão positiva e negativa (EC4-1-1, 9.7.2)
- Corte longitudinal sem amarração de extremidade (EC4-1-1, 9.7.3)
- Corte vertical (EC4-1-1, 9.7.5)
- Punçoamento (EC4-1-1, 9.7.6)

i) Flexão

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(1), no caso de interação total entre a chapa e o betão, a resistência à flexão de qualquer secção transversal deve ser determinada através da teoria plástica de acordo com EC4-1-1, 6.2.1.2(1), considerando neste caso o valor de cálculo da tensão de cedência da chapa, $f_{yp,d}$, em tração ou em compressão.

Também de acordo com EC4-1-1, 6.2.1.2(1), as secções efetivas das armaduras longitudinais tracionadas e comprimidas são solicitadas a uma tensão igual ao valor de cálculo da tensão de cedência, f_{sd} . Em alternativa a armadura comprimida da laje de betão poderá ser desprezada; e a secção efetiva do betão comprimido equilibra uma tensão de $0,85 f_{cd}$, constante em toda a altura entre o eixo neutro plástico e a fibra mais comprimida do betão, em que f_{cd} é o valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão, medida em provetes cilíndricos.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(3), na determinação da área efetiva A_{pe} das chapas de aço deverá ser desprezada a largura das bossas e dos recortes das chapas, a não ser que se demonstre, por meio de ensaios, que uma área maior é efetiva.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(4), o efeito da encurvadura local das partes comprimidas da chapa deverá ser tido em conta considerando larguras efetivas que não excedam o dobro dos valores limites indicados em EC3-1-1, Quadro 5.2.

Momento fletor positivo

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(5), a resistência sob a ação de momentos fletores positivos de uma secção transversal com o eixo neutro plástico (LN_{pl}) localizado acima da chapa deve ser calculado a partir da distribuição das tensões indicadas na Figura 3.2.

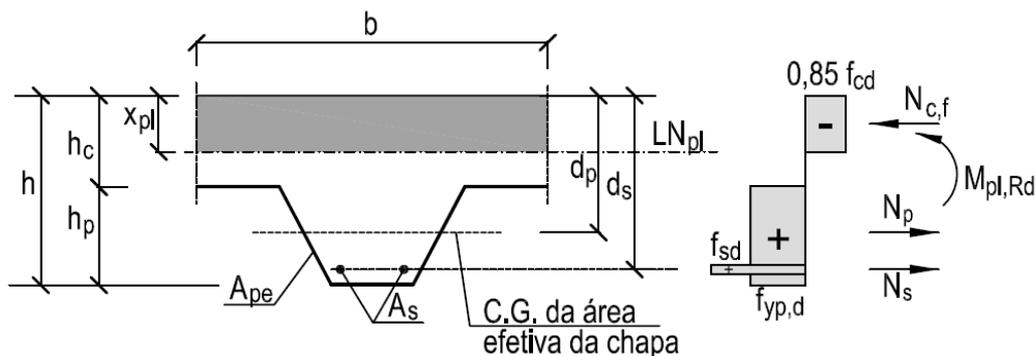


Figura 3.2 – Distribuição de tensões devidas a momentos fletores positivos, no caso em que o eixo neutro plástico (LN_{pl}) está localizado acima da chapa perfilada (adaptado do EC4-1-1, 9.7.2)

Os valores relativos ao posicionamento do eixo neutro plástico (LN_{pl}) e dos momentos fletores resistentes são obtidos pelas expressões a seguir apresentadas.

A profundidade do LN_{pl} (x_{pl}) é dada por:

$$x_{pl} = \frac{N_p + N_s}{N_{c,f}} \quad (3.22)$$

O momento fletor resistente é dado por:

$$M_{pl,Rd} = N_p (d_p - 0,5 x_{pl}) + N_s (d_s - 0,5 x_{pl}) \quad (3.23)$$

em que

$N_p = A_{pe} f_{yp,d}$: valor de cálculo da força de plastificação em tração da secção efetiva da chapa perfilada A_{pe} ;

$N_s = A_s f_{sd}$: valor de cálculo da força de tração da armadura A_s ;

$N_{c,f} = 0,85 f_{cd} b$: valor de cálculo da força de compressão do betão.

Momento fletor negativo

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(2), sob a ação de momentos fletores negativos, a contribuição das chapas de aço só deve ser tida em conta quando as chapas são contínuas e quando, para a fase de construção, não é efetuada uma redistribuição de momentos por plastificação das secções sobre os apoios.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.2(7), se for desprezada a contribuição das chapas de aço, a resistência de uma secção transversal sob a ação de momentos fletores negativos deverá ser calculada a partir da distribuição de tensões da Figura 3.3.

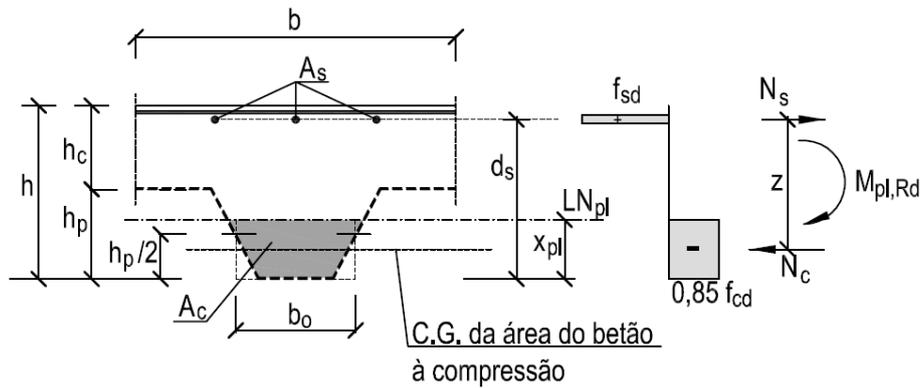


Figura 3.3 – Distribuição de tensões devidas a momentos fletores negativos
 (adaptado de EC4-1-1, 9.7.2)

A posição do eixo neutro plástico, x_{pl} , situa-se geralmente na chapa perfilada.

Sendo a contribuição desta desprezada, como se referiu, por estar à compressão e por poder encurvar e também por a sua contribuição para o momento resistente ser relativamente reduzida quando comparada com a contribuição do betão existente na nervura, e também desprezando a resistência do betão à tração, a posição do eixo neutro é determinada iterativamente até que se obtenha a expressão de equilíbrio

$$N_c = N_s \quad (3.24)$$

em que

$N_c = 0,85 f_{cd} A_c$: valor de cálculo da força de compressão no betão situado na nervura;

$N_s = A_s f_{sd}$: valor de cálculo da força de tração na armadura A_s .

Para evitar o cálculo iterativo da posição do eixo neutro plástico, considera-se que a área do betão comprimido tem uma largura igual à largura média da nervura b_0 , pelo que através da expressão de equilíbrio se obtém:

$$0,85 f_{cd} b_0 x_{pl} = A_s f_{sd} \quad (3.25)$$

$$x_{pl} = \frac{A_s f_{sd}}{0,85 f_{cd} b_0} \quad (3.26)$$

$$z = d_s - \frac{x_{pl}}{2} \quad (3.27)$$

O momento fletor resistente negativo pode ser obtido através da expressão:

$$M_{pl,Rd} = A_s f_{sd} z \quad (3.28)$$

ii) Corte longitudinal sem amarração de extremidade

No EC4-1-1 estão previstas duas situações para a determinação do valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal, $V_{l,Rd}$: i) corte longitudinal em lajes mistas sem amarração de extremidade; ii) corte longitudinal em lajes mistas com amarração de extremidade.

No presente relatório apenas se tratará a primeira situação referida.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.3(1), a verificação da segurança ao corte longitudinal sem amarração de extremidade aplica-se a lajes mistas com interligação mecânica ou por atrito, ou lajes dos tipos (a), e (b), tal como definido em EC4-1-1, 9.1.2.1.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.3(2), o valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal ($V_{l,Rd}$) é determinado pelo método $m-k$ ou pelo método de conexão parcial, sendo que este último apenas se aplica a lajes mistas com comportamento dúctil em relação ao corte longitudinal

De acordo com EC4-1-1, 9.7.3(4), o valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal ($V_{l,Rd}$) para uma largura b de laje é dado pela expressão:

$$V_{l,Rd} = \frac{b d_p}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m A_p}{b L_s} + k \right) \quad (3.29)$$

em que:

b : largura da secção considerada (em mm);

d_p : distância do centro de gravidade da chapa à face superior do betão (em mm);

A_p : área da secção transversal nominal da chapa perfilada (em mm^2);

m, k : valores de cálculo dos coeficientes empíricos obtidos a partir de ensaios realizados de acordo com EC4-1-1, Anexo B.3 (em N/mm^2);

L_s : vão de corte, definido de acordo com EC4-1-1, 9.7.3(5) (em mm);

$\gamma_{vs} = 1,25$: coeficiente parcial para o estado limite último relativo ao corte.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.3(5), para efeitos de cálculo, deverá adotar-se para o valor de L_s :

- $L/4$, para uma carga uniformemente aplicada na totalidade do tramo;
- a distância entre a carga aplicada e o apoio mais próximo, no caso de duas cargas iguais e dispostas simetricamente.

De acordo com EC4-1-1, 9.7.3(6), no caso em que a laje mista é calculada como contínua, é permitido a adoção de um vão isostático equivalente para a determinação da resistência. O vão deverá ser considerado igual a:

- $0,8 L$, para vãos intermédios;
- $0,9 L$, para vãos de extremidade.

iii) Corte vertical

De acordo com EC4-1-1, 9.7.5, a resistência ao esforço transversal $V_{v,Rd}$ de uma laje mista, numa largura igual à distância entre os eixos das nervuras, deverá ser determinado de acordo com o EC2-1-1, 6.2.2.

O artigo EC2-1-1, 6.2.2 refere-se a elementos para os quais não é exigida armadura de esforço transversal. Considerando uma largura equivalente da nervura como a largura da secção transversal, o valor de cálculo do esforço transversal resistente, $V_{v,Rd}$, de uma nervura é dado pela expressão:

$$V_{v,Rd} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (3.30)$$

com um mínimo de:

$$V_{v,Rd} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (3.31)$$

em que

f_{ck} : valor característico da tensão de rotura do betão à compressão (em MPa);

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} \leq 2,0$: coeficiente (d_p em mm);

d : altura útil da secção mista (em mm) (distância entre o centro de gravidade da armadura considerada da zona tracionada e a fibra extrema comprimida da secção mista);

$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d_p} \leq 0,02$: taxa de armadura longitudinal;

A_{sl} : área da armadura de tração (chapa perfilada mais armadura longitudinal dentro da nervura) prolongada de um comprimento $\geq (l_{bd} + d_p)$, para além da secção considerada (em mm²), sendo l_{bd} o comprimento de amarração de cálculo, de acordo com EC2-1-1, 8.4.4;

b_w : largura das nervuras ao nível do centro e gravidade da secção da chapa, caso esta seja considerada, ou largura média (b_o) das nervuras da chapa (ver Figura 3.4), caso esta não seja considerada (em mm);

$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{ck}$: valor médio da tensão normal na secção transversal de betão (em MPa);

N_{Ed} : esforço normal na secção devido às ações aplicadas ou ao pré-esforço (em N) ($N_{Ed} > 0$, para compressão);

A_c : área da secção transversal de betão (em mm²);

$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$;

$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$

$k_1 = 0,15$

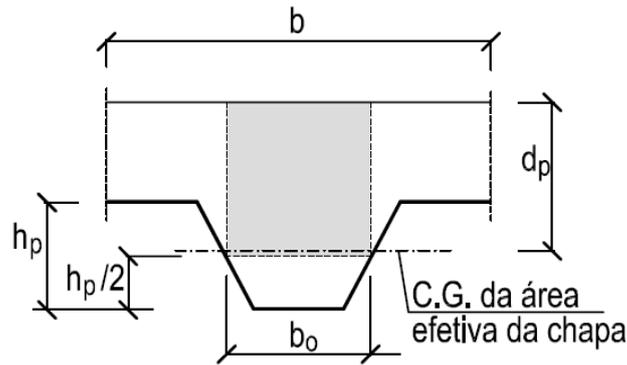


Figura 3.4 – Dimensões da laje mista a considerar no cálculo do esforço transversal resistente

De um modo geral como a chapa perfurada não é prolongada, para além do apoio, do comprimento de amarração de cálculo mais a altura útil da laje mista, a sua contribuição não pode ser considerada no cálculo de $V_{v,Rd}$. Se, para além disso, não existir armadura longitudinal nas nervuras, considera-se que a taxa de armadura é nula.

Por outro lado, como a laje mista pode ser calculada como simplesmente apoiada, o efeito benéfico da compressão do betão nas zonas de momento fletor negativo não é tido em conta e, assim, considera-se $\sigma_{cp} = 0$.

Assim, o valor de cálculo do esforço transversal resistente, $V_{v,Rd}$, para as lajes mistas com chapas perfuradas, em conformidade com EC2-1-1, exp. (6.2b), é obtido a partir de:

$$V_{v,Rd} = v_{min} b_o d_p \quad (3.32)$$

$$v_{min} = 0,035 \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d_p}} \right)^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (3.33)$$

Para as situações normais de lajes mistas em edifícios, a verificação da segurança em relação ao esforço transversal não é em geral condicionante, desde que as cargas não sejam elevadas e os vãos curtos.

iv) Punçoamento

De acordo com EC4-1-1, a resistência ao punçoamento, $V_{p,Rd}$, de uma laje mista ao nível de uma carga concentrada deverá ser determinada de acordo com EC2-1-1, 6.4.4, sendo o perímetro crítico determinado de acordo com EC4-1-1, Figura 9.8 (ver Figura 3.5).

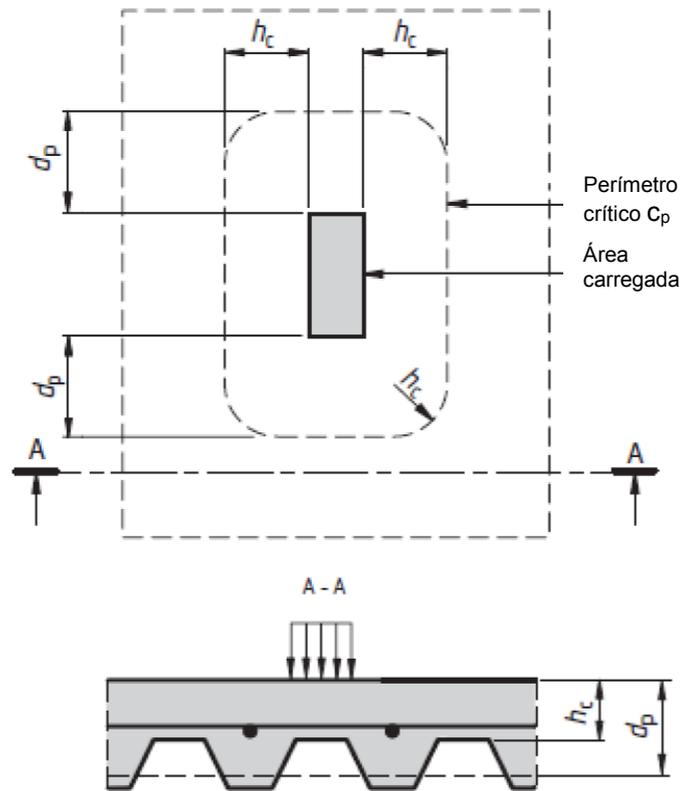


Figura 3.5 – Perímetro crítico de punçoamento (EC4-1-1, Figura 9.8)

De acordo com EC2-1-1, 6.4.4, o valor de cálculo da tensão resistente de punçoamento, $v_{p,Rd}$, (na secção de controlo da resistência) é obtido pela expressão:

$$v_{p,Rd} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \quad (3.34)$$

em que:

f_{ck} : valor característico da tensão de rotura do betão à compressão (MPa);

$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$: coeficiente (d em mm);

$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} + \rho_{lz}} \leq 0,02$: taxa de armaduras de tração nas direções y e z , devendo ρ_{ly} e ρ_{lz} ser calculados com os valores médios;

$\rho_{ly} = \frac{A_{sl,y}}{d b}$: taxa das armaduras de tração na direção y , sendo $A_{sl,y}$ a área de armadura por unidade de largura da laje;

$\rho_{lz} = \frac{A_{sl,z}}{d b}$: taxa das armaduras de tração na direção z , sendo $A_{sl,z}$ a área de armadura por unidade de largura da laje;

b : unidade de largura da laje (em geral 1 m).

O efeito benéfico da compressão do betão na laje é em geral desprezado, pelo que $\sigma_{cp} = 0$. Neste caso, o valor de cálculo das tensões resistentes ao punçoamento, $v_{p,Rd}$, será dado pela expressão:

$$v_{p,Rd} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq v_{min} \quad (3.35)$$

com v_{min} dado pela expressão:

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (3.36)$$

Tendo em conta que o perímetro crítico (ver Figura 3.5) é dado por:

$$\begin{aligned} c_p &= 2 \pi h_c + 2 (b_p + h_f) + 2 (a_p + 2 h_f + 2 d_p - 2 h_c) \\ c_p &= 2 \pi h_c + 2 (b_p + h_f) + 2 (a_p + 2 h_f + 2 d_p - 2 h_c) \end{aligned} \quad (3.37)$$

em que:

a_p e b_p : comprimento e largura da área carregada;

h_c : espessura do betão acima das nervuras;

h_f : espessura do revestimento sobre a laje mista e sob a área carregada.

v) Momentos fletores devidos a cargas concentradas pontuais e lineares

Quando cargas concentradas, pontuais e lineares, atuam na laje, de acordo com EC4-1-1, 9.4.3(1), essas cargas poderão ser consideradas como distribuídas numa largura efetiva, na falta de uma análise mais precisa.

Para a determinação dos esforços atuantes e dos esforços resistentes devidos às cargas concentradas referidas, de acordo com o previsto em EC4-1-1, 9.4.3(2), estas podem ser consideradas como distribuídas numa largura b_m , medida imediatamente acima das nervuras das chapas (ver Figura 3.6), obtida pela expressão:

$$b_m = b_p + 2 (h_c + h_f) \quad (3.38)$$

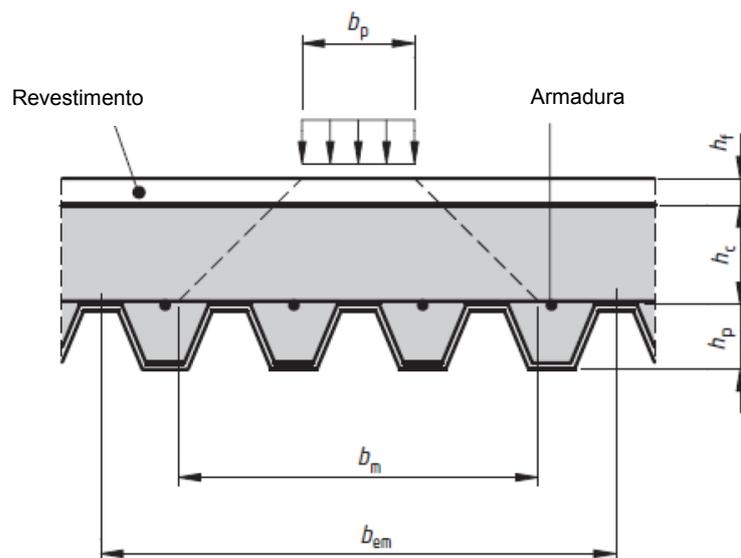


Figura 3.6 – Distribuição das cargas concentradas

De acordo com EC4-1-1, 9.4.3(3), para as cargas lineares deverá utilizar-se a expressão (3.38) para o cálculo de b_m considerando-se b_p como o comprimento de aplicação da carga linear.

No caso de se verificar $h_p/h \leq 0,60$, tal como acontece nas lajes em apreciação, de acordo com o previsto em EC4-1-1, 9.4.3(4), a largura da laje a considerar como efetiva, para a análise global e para o cálculo da resistência, poderá, por simplificação, ser determinada através das expressões (3.39) a (3.41):

a) para a flexão e o corte longitudinal:

– para tramos isostáticos e para os tramos de extremidade de lajes contínuas:

$$\begin{aligned} b_{em} &= b_m + 2L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \\ b_{em} &= b_m + 2L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \end{aligned} \quad (3.39)$$

– para tramos intermédios de lajes contínuas:

$$\begin{aligned} b_{em} &= b_m + 1,33L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \\ b_{em} &= b_m + 1,33L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \end{aligned} \quad (3.40)$$

b) para o esforço transversal:

$$\begin{aligned} b_{em} &= b_m + L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \\ b_{em} &= b_m + L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \end{aligned} \quad (3.41)$$

em que:

L_p : distância entre o centro da carga e o apoio mais próximo;

L : vão.

De acordo com o EC4-1-1, 9.4.3(5), poderá utilizar-se uma armadura transversal nominal não calculada se o valor característico das sobrecargas não exceder os valores seguintes:

– carga concentrada: 7,5 kN;

– carga distribuída: 5,0 kN/m².

Esta armadura transversal nominal deverá ter uma secção transversal com área não inferior a 0,2 % da área de betão localizado acima das nervuras, e deverá dispor-se numa largura não inferior a b_{em} , como calculada nas expressões (3.39) a (3.41). Deverão assegurar-se comprimentos de amarração mínimos para além desta largura de acordo com a EC2-1-1. Uma armadura adotada para outros fins poderá ser utilizada total ou parcialmente para satisfazer esta regra.

De acordo com o EC4-1-1(6), no caso de as condições indicadas anteriormente não serem satisfeitas, deverá determinar-se a distribuição dos momentos fletores resultantes das cargas concentradas pontuais ou lineares e adotar-se a armadura transversal adequada segundo o EC2-1-1.

3.3.5 Verificação em relação aos estados limites de utilização/serviço (ELS)

A verificação em relação aos estados limites de utilização/serviço (ELS) é efetuada, de acordo com EC4-1-1, 9.8, através do controlo da fendilhação do betão e do controlo das flechas.

i) Controlo da fendilhação do betão

O estado limite de fendilhação do betão é abordado no EC4-1-1, 9.8.1.

A fendilhação do betão corresponde às situações em que se verificam trações na face superior das lajes, ou seja, trações apenas devidas à retração do betão, no caso de lajes simplesmente apoiadas, ou trações devidas à retração e a momentos negativos nos apoios de continuidade, no caso de lajes contínuas, ou em casos em que existem restrições de rotação das secções dos apoios extremos.

Para limitar a fendilhação do betão em zona corrente da face superior da laje mista, o EC4-1-1, 9.2.1(3), (4) e (5) impõe a colocação de armaduras transversais e longitudinais na espessura da camada de betão acima da chapa perfilada. A área da armadura em cada uma das duas direções não deve ser inferior a 0,1% da área da secção do betão situada acima das nervuras, nem inferior a $80 \text{ mm}^2/\text{m}$, não devendo o espaçamento dos varões da armadura exceder o menor dos seguintes valores $2h$ e 350 mm . Esta armadura deve posicionar-se junto à face superior da laje, garantindo-se o respetivo recobrimento.

Nas regiões de maior sismicidade recomenda-se que a armadura de distribuição nas duas direções seja no mínimo de $142 \text{ mm}^2/\text{m}$, com amarração adequada para permitir o funcionamento em diafragma da laje.

No que se refere à fendilhação do betão devido aos momentos fletores negativos, o EC4-1-1, 9.8.1 remete para o EC2-1-1, 7.3, a verificação da largura de fendas, a qual pode ser efetuada ou através de cálculo do momento fletor correspondente à largura de fendas com um valor limite predefinido ou através da imposição de uma armadura mínima sem o cálculo direto.

No caso de se admitir a formação de fendas sem que seja necessário avaliar a largura dessas fendas, como são as situações em que se admite a análise das lajes contínuas como lajes simplesmente apoiadas, impõe-se no EC4-1-1, 9.8.1(2), como se referiu, uma quantidade mínima de armadura, localizada acima das nervuras, com uma área não inferior a:

- 0,2% da área da secção de betão situado acima das nervuras, para lajes não escoradas;
- 0,4% da área da secção de betão situado acima das nervuras, para lajes escoradas.

Tal como se prevê para as vigas mistas calculadas como simplesmente apoiadas, de acordo com EC4-1-1, 7.4.1(4), também no caso das lajes mistas, a armadura referida se deverá prolongar, prevendo-se neste caso que o prolongamento seja de um comprimento igual a $1/3 L$ de cada lado do apoio intermédio, em que L é o comprimento do tramo considerado (CSTB, 2014).

Esta armadura não garante necessariamente que as larguras de fendas sejam inferiores à largura máxima (W_{max}) definida em EC2-1-1, Quadro 7.1N.

ii) Controlo da deformação (flechas)

De acordo com EC4-1-1, 9.8.2(1) deve aplicar-se o disposto em EC0, 3.4 relativo aos estados limites de utilização.

De acordo com EC0, Anexo A1.4, as deformações verticais devem ser calculadas utilizando as ações apropriadas, devidamente combinadas, tendo em conta os requisitos de utilização da estrutura.

De acordo com EC4-1-1, 9.8.2(3), as flechas devidas às cargas aplicadas às lajes em fase mista deverão ser calculadas através de análise elástica linear, desprezando o efeito da retração.

De acordo com EC4-1-1, 9.8.2(5), para um tramo intermédio de uma laje contínua em que a conexão entre a chapa perfilada e o betão é a prevista em EC4-1-1, 9.1.2.1(1), alíneas a), b) e c), a flecha pode ser determinada com as seguintes aproximações:

- o momento de inércia poderá ser considerado igual à média dos valores relativos à secção fendilhada e à secção não fendilhada;
- para o betão poderá utilizar-se um valor médio do coeficiente de homogeneização para os efeitos de curto (n_1) e longo prazo (n_2); adotando o critério do EC4-1-1, 5.4.2.2(11), os efeitos da fluência nas lajes mistas podem ser considerados substituindo as áreas de betão A_c por áreas equivalentes efetivas de aço A_c/n , quer para as ações de curta duração, em que $n_1 = E_a/E_c$, quer para as ações de longa duração, em que $n_2 = 3 E_a/E_c$, sendo n o coeficiente de homogeneização nominal dado por:

$$n = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad (3.42)$$

o que corresponde a adotar um coeficiente de homogeneização nominal de:

$$n = \frac{2 E_a}{E_c} \quad (3.43)$$

em que:

E_c : valor médio do módulo de elasticidade do betão

E_a : valor do módulo de elasticidade do aço

Os valores do momento de inércia e da posição da linha neutra para a secção não fendilhada (ver Figura 3.7) são dados, respetivamente, pelas expressões:

$$I_{eq,1} = \frac{b h_c^3}{12 n} + \frac{b h_c}{n} \left(x_e - \frac{h_c}{2}\right)^2 + \frac{b_0 h_p^3}{12 n} + \frac{b_0 h_p}{n} \left(h - x_e - \frac{h_p}{2}\right)^2 + A_{pe} (d_p - x_e)^2 + I_p \quad (3.44)$$

$$x_e = \frac{\frac{b h_c^2}{2} + b_0 h_p d_p + n A_{pe} d_p}{b h_c + b_0 h_p + n A_{pe}} \quad (3.45)$$

em que:

x_e : posição (em relação à fibra superior) do eixo neutro elástico (em *mm*);

I_p : momento de inércia da chapa perfilada (em mm^4);

A_{pe} : área da secção efetiva da chapa perfilada (em mm^2);

n : valor médio do coeficiente de homogeneização;

b_0 : largura média da nervura (em mm)

d_p : distância à fibra superior do centro de gravidade da chapa perfilada.

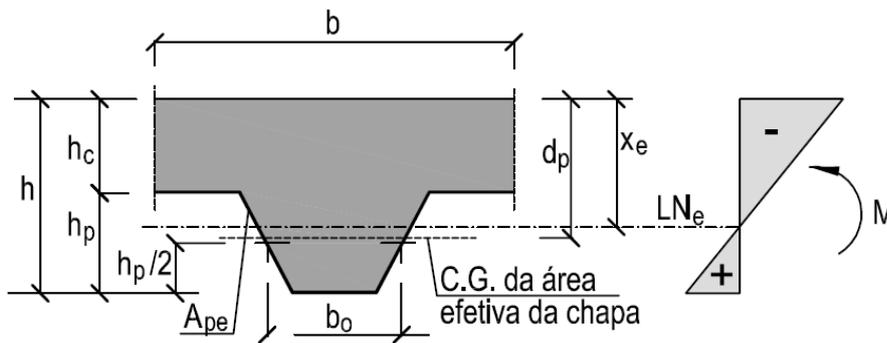


Figura 3.7 – Posição do eixo neutro (LN_e) da secção mista não fendilhada sujeita a momento fletor positivo

Os valores do momento de inércia e da posição da linha neutra para a secção fendilhada (Figura 3.8) são dados, respetivamente, pelas expressões:

$$I_{eq,2} = \frac{b x_e^3}{3n} + I_p + A_{pe} \times (d_p - x_e)^2 \quad (3.46)$$

$$x_e = \frac{n A_{pe}}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d_p}{n A_{pe}}} - 1 \right) \quad (3.47)$$

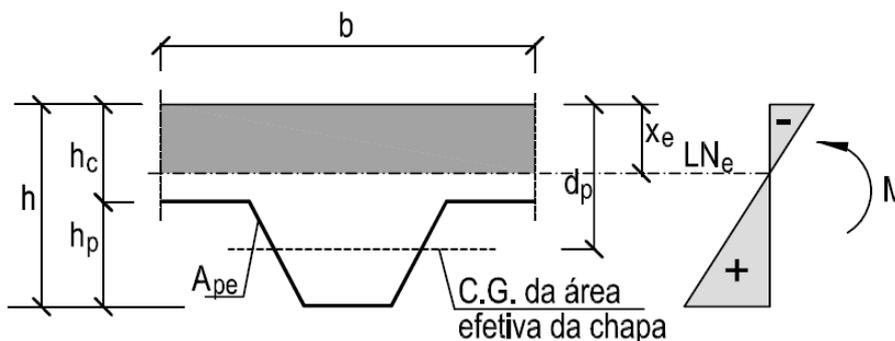


Figura 3.8 – Posição do eixo neutro (LN_e) da secção mista fendilhada sujeita a momento fletor positivo

Para o cálculo da flecha a meio vão desprezam-se geralmente os momentos fletores sobre os apoios considerando, portanto, que a laje mista é simplesmente apoiada e utiliza-se um momento de inércia equivalente (I_{eq}) dado pela média dos valores relativos à secção não fendilhada e à secção fendilhada:

$$I_{eq} = \frac{I_{eq,1} + I_{eq,2}}{2} \quad (3.48)$$

De acordo com EC4-1-1, 9.8.2(4), o cálculo das flechas pode ser dispensado nas duas situações seguintes:

- a relação entre o vão (L) e a altura útil da laje (d_p) não excede os limites indicados em EC2-1-1, 7.4, para betão levemente solicitado;
- quando é satisfeito o disposto em EC4-1-1, 9.8.2(6), para que se possam desprezar os efeitos de escorregamento de extremidade.

De acordo com EC2-1-1, 7.4.2(2), que se refere aos casos em que o cálculo da flecha pode ser dispensado, essa dispensa pode ser realizada desde que não se ultrapassem os valores limite de L/d_p que podem ser obtidos pela expressão (7.16), dessa mesma secção do EC2-1-1.

Para os casos correntes, são definidos em EC2-1-1, Quadro 7.4N os valores limite da relação vão/altura útil (L/d_p) que podem ser aplicados para lajes mistas, considerando o valor de $\rho = 0,5\%$, em que ρ é a taxa da armadura necessária a meio vão para equilibrar o momento devido às ações de cálculo.

Referem-se nesse quadro os seguintes valores máximos de L/d_p , a satisfazer:

- para vãos de lajes simplesmente apoiadas: $L/d_p = 20$;
- para vãos extremos de lajes contínuas: $L/d_p = 26$;
- para vãos intermédios de lajes contínuas: $L/d_p = 30$.

No entanto, tal como também definido em EC2-1-1, 7.4.2(2), referindo-se estes valores de L/d_p a uma tensão no aço, numa secção fendilhada a meio vão de uma laje, de 310 MPa (para um aço de $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$), no caso de outros níveis de tensão, os valores de L/d_p referidos deverão ser multiplicados por $310/\sigma_s$, em que σ_s é a tensão de tração no aço a meio vão para as ações de cálculo no estado limite de utilização, dada pela expressão:

$$\sigma_s = \frac{M_{sd}}{I_{eq,2}} (d_p - x_e) \quad (3.49)$$

em que:

M_{sd} : valor de cálculo do momento a meio vão correspondente às ações quase-permanentes;

$I_{eq,2}$: momento de inércia da secção fendilhada;

d_p : altura útil da secção mista;

x_e : distância do eixo neutro (LN_e) da secção fendilhada à fibra superior.

De acordo com EC2-1-1, 7.4.1(4) e (5), as flechas das lajes sujeitas a ações quase-permanentes poderão ser limitadas a $L/250$, em geral, ou a $L/500$, quando essas flechas são suscetíveis de danificar elementos adjacentes às lajes, podendo ser adotados outros limites em função da sensibilidade destes elementos.

4 | Considerações finais

As lajes mistas de aço-betão são realizadas segundo os métodos descritos no Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1), mais precisamente na secção 9 “Lajes mistas com chapa perfiladas de aço em edifícios”.

Tratando esta mesma norma os dois materiais, remete para o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1) a parte relativa ao betão e para o Eurocódigo 3 (NP EN 1993-1-3 e NP EN 1993-1-1) a parte relativa ao aço.

Apresentaram-se neste documento os critérios de cálculo para verificação da segurança estrutural das secções de aço da chapa perfilada, em fase de construção, e da secção mista de aço-betão, em fase de serviço.

Pretende-se na sequência deste trabalho tratar de outros aspetos, os relativos à segurança ao incêndio, ao comportamento térmico e ao comportamento acústico dos pavimentos executados com as lajes mistas.

Noutra parte do trabalho seguinte serão ainda tratados aspetos relativos à execução dos pavimentos, aos seus revestimentos e às condições de segurança em obra.

O presente estudo foi financiado pelo Projeto do Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC
“COMPAV – Comportamento estrutural / sísmico de pavimentos prefabricados de betão”.

Lisboa, LNEC, junho de 2021

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Economia, Gestão e
Tecnologia da Construção



Álvaro Vale e Azevedo

AUTORIA



Manuel Francisco C. Baião
Investigador Principal

O Diretor do Departamento de Edifícios



Jorge M. Grandão Lopes

Referências bibliográficas

- BEGUIN, Ph.; SOKOL, L., 1995 – **Application de l'Éurocode 4 et de l'Éurocode 3, Partie 1.3. Dimensionnement des dalles mixtes. Première partie : Dimensionnement de la tôle profilée utilisée comme coffrage** - Revue Construction Métallique, nº 1, 1995.
- BEGUIN, Ph.; CRISINEL, M.; SOKOL, L., 1995 – **Application de l'Éurocode 4-DAN. Dimensionnement des dalles mixtes. Deuxième partie : Dimensionnement de dalles mixtes en phase définitive mixte** – Revue Construction Métallique, nº 2, 1995.
- CALADO, Luís; SANTOS, João, 2010 – **Estruturas mistas de aço e betão**. Lisboa: IST Press, abril de 2010. ISBN 9789728469849.
- CSTB, 2014 – **Cahier des prescriptions techniques communes aux procédés de planchers collaborants**. e-Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Cahier 3730_V2, octobre 2014.
- EN 1993-1-5:2006 – **Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements**. European Committee for Standardization (CEN), October 2006. (EC3-1-5).
- EN 1991-1-6:2005 – **Eurocode 1 - Actions on structures. Part 1-6: General actions – Actions during execution**. European Committee for Standardization (CEN), June 2005. (EC1-1-6).
- EN 1993-1-3:2006 – **Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting**. European Committee for Standardization (CEN), October 2006. (EC3-1-3).
- EN 508-1:2014 – **Roofing and cladding products from metal sheet. Specification for self-supporting of sheet, aluminium or stainless-steel sheet – Part 1: Steel**. European Committee for Standardization (CEN), May 2014.
- GARDNER, L.; NETHERCOT, D.A., 2011 – **Designer's guide to Eurocode 3: Design of steel buildings EN 1993-1-1, -1-3 and -1-8**. Designer's guides to the Eurocodes. London: ICE Publishing, ISBN 978-0-7277-4172-1.
- JOHNSON, Roger, 2012 – **Designer's guide to Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures EN 1994-1-1**. Designer's guides to the Eurocodes. London: ICE Publishing, ISBN 978-0-7277-4173-8.
- NP EN 1090-1:2009+A1:2013 – **Execução de estruturas de aço e de estruturas de alumínio. Parte 1: Requisitos para a avaliação de conformidade de componentes estruturais**. Instituto Português da Qualidade, março de 2013.
- NP EN 1090-2:2008+A1:2015 – **Execução de estruturas de aço e de estruturas de alumínio. Parte 2: Requisitos técnicos para estruturas de aço**. Instituto Português da Qualidade, setembro de 2013.
- NP EN 1990:2009 – **Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas**. Instituto Português da Qualidade, 2009. (EC0).

NP EN 1991-1-1:2009 – **Eurocódigo 1 - Ações em estruturas. Parte 1-1: Ações gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2009. (EC1-1-1).

NP EN 1992-1-1:2010 – **Eurocódigo 2 - Projeto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2010. (EC2-1-1).

NP EN 1993-1-1:2010 – **Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2010. (EC3-1-1).

NP EN 1994-1-1:2011 – **Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mistas aço-betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.** Instituto Português da Qualidade, 2011. (EC4-1-1).

NP EN 10346:2016 – **Produtos planos de aço revestidos em contínuo por imersão a quente para conformação a frio. Condições técnicas de fornecimento.** Instituto Português da Qualidade, maio de 2016.

https://www.bimobject.com/pt-br/europerfil/product/korona_60_fc.

