

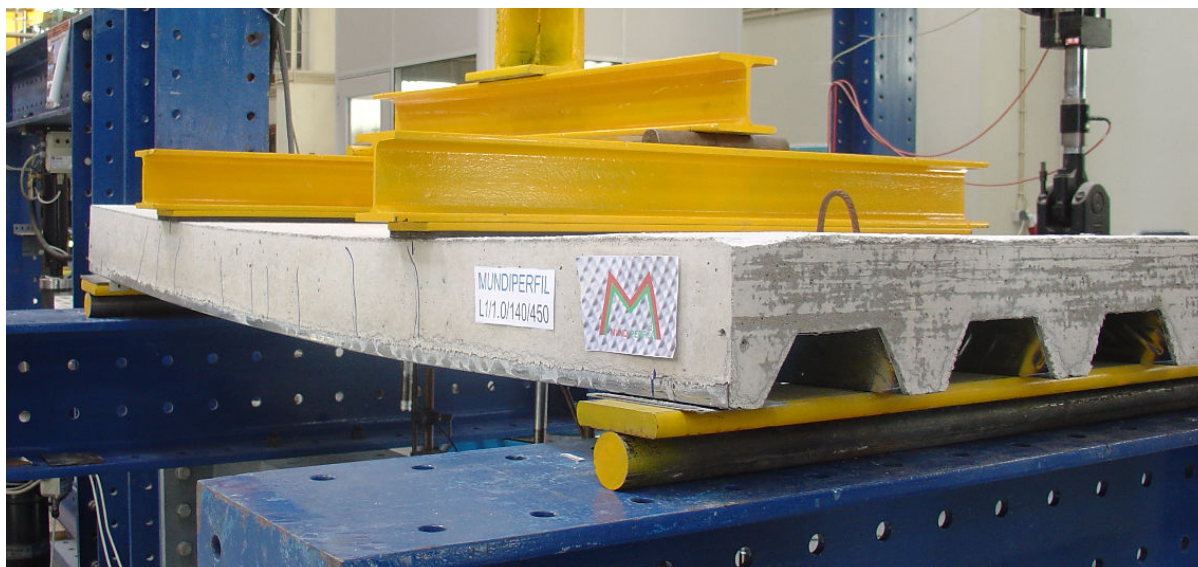


Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP
Departamento de Engenharia Civil



Laboratório do Betão Estrutural

TABELAS DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS MUNDIDECK



**Análise do Comportamento e Dimensionamento
de Lajes Mistas com Chapas Perfiladas,**
trabalho solicitado ao LABEST / FEUP pela firma
MUNDIPERFIL - Perfilagens a Frio, Lda.

Autores:

José Santos

Rui Faria

Joaquim Figueiras

Outubro / 2010

TABELAS DE DIMENSIONAMENTO DE LAJES MISTAS MUNDIDECK

Análise do Comportamento e Dimensionamento de Lajes Mistas com Chapas Perfiladas

SUMÁRIO

Este relatório resulta do contrato celebrado entre o LABEST - Laboratório do Betão Estrutural da FEUP e a MUNDIPERFIL - Perfilagens a Frio, Lda., e responde à Fase 2 do Plano de Trabalhos correspondente à realização de um documento de apoio ao projectista, para o dimensionamento de lajes mistas executadas com a chapa perfilada MUNDIDECK da marca MUNDIPERFIL.

O documento começa com uma breve introdução alusiva às potencialidades das lajes mistas. O corpo principal do relatório é composto por várias secções, sendo de destacar: i) a caracterização mecânica dos materiais e a caracterização das lajes mistas; ii) a verificação da segurança do ponto de vista regulamentar; iii) a apresentação de tabelas para dimensionamento directo; iv) as disposições construtivas; v) as indicações complementares e vi) dois exemplos de aplicação.

Com este documento o projectista terá a informação necessária para o projecto de lajes mistas com a chapa perfilada MUNDIDECK da marca MUNDIPERFIL.

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Concepção de lajes mistas	1
1.2	Campo de aplicação	1
2	Características Mecânicas e Geométricas das Chapas perfiladas, do Betão e da Secção Mista.....	3
2.1	Características mecânicas dos diferentes materiais das lajes mistas	3
2.2	Características geométricas.....	4
3	Elementos de Cálculo	9
3.1	Fase mista	9
3.2	Fase de cofragem	16
4	Tabelas de Dimensionamento	17
4.1	Pressupostos	17
4.2	Tabelas de dimensionamento directo	18
5	Disposições Construtivas para as Lajes Mistas	27
5.1	Espessuras mínimas	27
5.2	Condições de apoio	28
5.3	Armaduras	29
5.4	Fixações das chapas perfiladas aos apoios	30
5.5	Escoramento das chapas perfiladas.....	31
6	Indicações Complementares	33
6.1	Aumento da resistência ao corte longitudinal	33
6.2	Protecção ao fogo.....	33
6.3	Isolamento acústico	34
7	Exemplos de Dimensionamento	37
7.1	Exemplo 1: Laje mista simplesmente apoiada	37
7.2	Exemplo 2: Laje mista contínua.....	48
8	Bibliografia.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Concepção de lajes mistas

Uma laje mista é o resultado da associação de uma chapa perfilada de aço a uma camada de betão que lhe é sobreposta. Na fase inicial do processo construtivo a chapa perfilada funciona como uma cofragem para colocação do betão e, após o endurecimento deste último, intervém como uma armadura de tracção para momentos positivos. Assim, para resistir a momentos flectores positivos o betão funciona à compressão e o aço da chapa perfilada à tracção, garantindo o conjunto um binário de forças resistentes. A principal diferença para o betão armado consiste na aderência entre os dois materiais, que no caso de lajes mistas necessita de verificação e atenção específicas. A chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL apresenta características apropriadas para que em obra a respectiva ligação ao betão seja adequada.

1.2 Campo de aplicação

As lajes mistas aço-betão com chapa perfilada apresentam diversas vantagens relativamente a soluções tradicionais, sendo as chapas perfiladas de aço mais leves do que as cofragens convencionais, o que permite que o respectivo manuseamento e colocação em obra sejam consideravelmente mais fáceis e rápidos. Por outro lado, dado que a chapa perfilada além de armadura resistente é ela própria uma cofragem autoportante, deixa de ser necessária a fase da descofragem, e a utilização de escoramentos é reduzida ou mesmo dispensada. Uma vez que as lajes são nervuradas existe ainda uma redução do volume (e peso) de betão, por comparação com uma laje maciça da mesma espessura.

Atendendo a estes aspectos a utilização de lajes mistas aço-betão proporciona uma assinalável rapidez de montagem, assegurando economias significativas na construção em muitas situações práticas. Esta solução construtiva tem aplicação em edifícios habitacionais, bem como em superfícies comerciais, ou ainda em oficinas, edifícios industriais e parques de estacionamento.

Para além do campo de aplicação das lajes mistas aço-betão, a chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL pode ser usada sob diversas formas nas estruturas, contribuindo ou não para a resistência destas. Uma das aplicações está relacionada com o respectivo funcionamento como cofragem autoportante em lajes. Um exemplo prático desta aplicação são as lajes de tabuleiros de pontes.

2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E GEOMÉTRICAS DAS CHAPAS PERFILADAS, DO BETÃO E DA SECÇÃO MISTA

2.1 Características mecânicas dos diferentes materiais das lajes mistas

Chapa Perfilada MUNDIDECK

- Fabrico: A folha de aço de carbono de qualidade estrutural é revestida por um banho quente contínuo de zinco
- Normas de fabrico: EN 10326 / EN 10143
- Classe de resistência mínima: S320GD+Z
- Valor característico mínimo da tensão de cedência do aço da chapa : $f_{yb} = f_{yp} = 320 \text{ MPa}$
- Valor característico mínimo da tensão de rotura do aço da chapa: $f_u = 390 \text{ MPa}$
- Módulo de elasticidade do aço da chapa: $E_a = 210 \text{ GPa}$
- Massa do revestimento de zinco: 275 g/m^2
- Espessura do revestimento de zinco: 0.02 mm/face
- Coeficiente parcial de segurança para estados limites últimos: $\gamma_a = \gamma_{m0} = \gamma_{m1} = 1.00$

Betão

- Classe de resistência mínima: C20/25
- Valor característico mínimo da tensão de rotura do betão à compressão em cilindros aos 28 dias de idade: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$
- Peso volúmico do betão armado: 25 kN/m^3
- Peso volúmico do betão armado fresco: 26 kN/m^3
- Coeficiente parcial de segurança para estados limites últimos: $\gamma_c = 1.50$

Aço em varão ou rede electrossoldada

- Classe de resistência e ductilidade mínimas: A500 NR SD (B500C, segundo a norma EN 10027-1)
- Valor característico mínimo da tensão de cedência à tracção do aço das armaduras: . $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- Coeficiente parcial de segurança para estados limites últimos: $\gamma_s = 1.15$

2.2 Características geométricas

2.2.1 Chapa perfilada MUNDIDECK

A geometria da chapa perfilada MUNDIDECK está ilustrada na Fig. 1. A chapa perfilada apresenta 4.44 nervuras/m de largura (8.88 almas/m de largura). Na Tabela 1 especificam-se as espessuras para cálculo e os pesos próprios desta chapa perfilada por unidade de área.

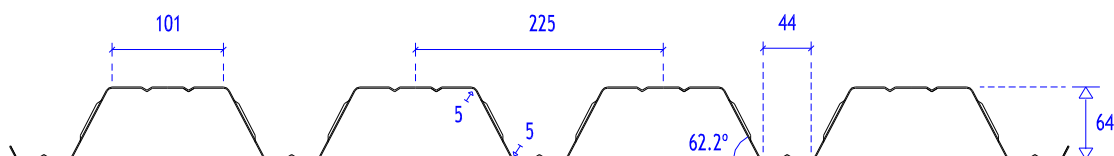


Fig. 1 - Geometria [mm] de uma unidade de chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL.

Tabela 1 - Chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL.

Espessura comercial	Espessura para cálculo [mm]	Peso próprio [kN/m ²]
$e = 0.8$ mm	0.76	0.08
$e = 1.0$ mm	0.96	0.10

Para a verificação aos estados limites em que a chapa perfilada intervém como elemento estrutural sem a colaboração do betão - fase de cofragem - ou em funcionamento conjuntamente com aquele material - fase mista - é fundamental conhecer as propriedades geométricas da correspondente secção transversal. Como se ilustrará no Capítulo 3, para cada verificação a realizar será necessário considerar uma secção transversal de chapa perfilada diferente. Esta situação deve-se, por um lado, à necessidade de considerar os fenómenos de instabilidade nas zonas comprimidas da chapa perfilada na fase de cofragem e, por outro lado, à ausência de regras claras no EC4 sobre as verificações em fase mista. Apresentam-se de seguida as propriedades geométricas a considerar em cada uma das secções transversais. Por simplificação, nas Fig. 2 a Fig. 6 serão apenas exibidas duas nervuras.

- **Secção transversal A:** serve para verificar a resistência da chapa perfilada aos momentos flectores positivos de cálculo em fase de cofragem, e para determinação da flecha em serviço em fase mista. As correspondentes propriedades geométricas encontram-se descritas na Tabela 2.



Fig. 2 - Secção transversal A.

Tabela 2 - Propriedades geométricas da secção transversal A.

Chapa	y_G [cm]	I_p [cm ⁴ /m]	W_p [cm ³ /m]
$e = 0.8$ mm	2.90	42.8	12.2
$e = 1.0$ mm	3.04	56.6	16.9

y_G - Posição do eixo neutro da secção transversal da chapa perfilada

I_p - Momento de inércia da secção transversal da chapa perfilada por metro de largura

W_p - Módulo de flexão da secção transversal da chapa perfilada por metro de largura

- **Secção transversal B:** serve para verificar a resistência da chapa perfilada a momentos flectores negativos de cálculo em fase de cofragem. As correspondentes propriedades geométricas encontram-se descritas na Tabela 3.



Fig. 3 - Secção transversal B.

Tabela 3 - Propriedades geométricas da secção transversal B.

Chapa	y_G [cm]	I_p [cm ⁴ /m]	W_p [cm ³ /m]
$e = 0.8$ mm	4.19	57.6	13.7
$e = 1.0$ mm	4.13	75.6	18.3

- **Secção transversal C:** serve para verificar a resistência da chapa perfilada ao esforço transversal de cálculo na fase de cofragem e aos momentos flectores positivos e negativos de cálculo em fase mista. As correspondentes propriedades geométricas encontram-se descritas na Tabela 4.



Fig. 4 - Secção transversal C.

Tabela 4 - Propriedades geométricas da secção transversal C.

Chapa	y_G [cm]	A_p [cm ² /m]	I_p [cm ⁴ /m]	h_w [cm]	b_c [cm/m]
$e = 0.8$ mm	4.02	7.36	62.6	2.50	23.6
$e = 1.0$ mm	4.04	9.30	79.0	2.50	23.6

A_p - Área da secção transversal da chapa perfilada por metro de largura

h_w - Altura da chapa perfilada descontando a zona das bossas ($h_{w1} + h_{w2}$)

b_c - somatório das larguras das nervuras à cota do banzo inferior da chapa perfilada por metro de largura (para verificação dos momentos negativos em fase mista)

- **Secção transversal D:** serve para verificar a resistência ao esforço transversal de cálculo em fase mista. As correspondentes propriedades geométricas encontram-se descritas na Tabela 5.



Fig. 5 - Secção transversal D.

Tabela 5 - Propriedades geométricas da secção transversal D.

Chapa	y_G [cm]	A_{sl} [cm ² /m]	b_{w1} [cm/m]	b_{w2} [cm/m]
$e = 0.8$ mm	1.83	3.83	38.1	46.5
$e = 1.0$ mm	1.85	4.84	38.1	46.5

$A_{sl} = A_p$ - Área da secção transversal da chapa perfilada por metro de largura

b_{w1} - somatório das larguras das nervuras à cota do centro das bossas por metro de largura (para verificação ao esforço transversal com momentos flectores positivos em fase mista)

b_{w2} - somatório das larguras das nervuras à cota superior das bossas por metro de largura (para verificação ao esforço transversal com momentos flectores negativos em fase mista)

- **Secção transversal E:** serve para verificar a resistência ao esforço de corte longitudinal de cálculo em fase mista. As correspondentes propriedades geométricas encontram-se descritas na Tabela 6.

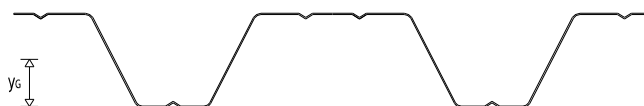


Fig. 6 - Secção transversal E.

Tabela 6 - Propriedades geométricas da secção transversal E.

Chapa	y_G [cm]	A_p [cm ² /m]
$e = 0.8$ mm	3.86	10.30
$e = 1.0$ mm	3.87	13.00

2.2.2 Lajes mistas com chapa perfilada MUNDIDECK

O peso próprio característico (G_{pp}) das lajes mistas em função da respectiva espessura total (H) é especificado na Tabela 7.

Tabela 7 - Peso próprio das lajes mistas.

H [cm]	12	13	14	15	16	18	20
G_{pp} [kN/m ²]	2.1	2.4	2.6	2.9	3.1	3.6	4.1

A área da lajeta de betão acima das nervuras (A_{ct}), por metro de largura, em função da espessura total (H) da laje mista está indicada na Tabela 8.

Tabela 8 - Área da lajeta.

H [cm]	12	13	14	15	16	18	20
A_{ct} [cm ² /m]	560	660	760	860	960	1160	1360

Os parâmetros m e k para a verificação da resistência de cálculo ao esforço de corte longitudinal em função da espessura de chapa (conforme o Relatório dos Ensaios Experimentais) encontram-se definidos na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros m e k.

Chapa	m [N/mm ²]	k [N/mm ²]
e = 0.8 mm	153.89	0.0675
e = 1.0 mm	154.30	0.0374

Os momentos de inércia I_{cu} das lajes mistas considerando para o betão secções não fissuradas (homogeneização em aço) estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Momentos de inércia não fissurada (homogeneização em aço).

e [mm]		H [cm]						
		12	13	14	15	16	18	20
0.8	x_u [cm]	4.97	5.43	5.90	6.37	6.84	7.80	8.78
	I_{cu} [cm ⁴ /m]	741	930	1152	1411	1709	2435	3356
1.0	x_u [cm]	5.06	5.52	5.99	6.47	6.95	7.92	8.89
	I_{cu} [cm ⁴ /m]	773	969	1198	1465	1773	2521	3467

x_u - profundidade do eixo neutro a partir das fibras de betão mais comprimidas

Valores obtidos com um coeficiente de homogeneização médio $n = E_a / E_c = 14$, sendo E_a o módulo de elasticidade do aço da chapa e E_c o módulo de elasticidade do betão.

Os momentos de inércia I_{cc} das lajes mistas considerando para o betão secções fissuradas na face inferior (homogeneização em aço) estão definidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Inércia fissurada (homogeneização em aço).

e [mm]		H [cm]						
		12	13	14	15	16	18	20
0.8	x_c [cm]	3.13	3.38	3.62	3.85	4.07	4.49	4.88
	I_{cc} [cm ⁴ /m]	310	386	473	571	681	935	1235
1.0	x_c [cm]	3.41	3.69	3.96	4.21	4.46	4.92	5.36
	I_{cc} [cm ⁴ /m]	368	458	561	679	810	1114	1476

x_c - profundidade do eixo neutro a partir das fibras de betão mais comprimidas

Valores obtidos com $n = E_a / E_c = 14$.

3 ELEMENTOS DE CÁLCULO

Apesar da maioria dos aspectos referidos neste Capítulo estarem descritos no Eurocódigo 4 - Parte 1.1, procedeu-se a uma particularização das verificações a realizar no caso específico da chapa perfilada MUNDIDECK.

3.1 Fase mista

A verificação da segurança de uma laje em fase mista integra o controlo dos seguintes estados limites:

- Estados Limites de Serviço: fendilhação do betão e flecha da laje;
- Estados Limites Últimos: segurança aos momentos flectores positivos, aos momentos flectores negativos, ao esforço transversal, ao esforço de corte longitudinal e ao punçoamento.

O Subcapítulo 9.3.3 do EC4 - Parte 1.1, referente às acções, reencaminha o projectista para o EC1 - Parte 1.1. As acções a considerar são, em geral: o peso próprio da laje mista, das paredes divisórias, dos revestimentos, e de outras cargas permanentes, bem como as sobrecargas e outras acções variáveis.

3.1.1 Estados Limites de Serviço

Os Estados Limites de Serviço, referentes ao controlo da fendilhação do betão e da flecha da laje, estão tratados no Capítulo 9.8 do EC4 - Parte 1.1. O Subcapítulo 9.4.2 do EC4 - Parte 1.1 sugere a adopção de uma análise linear elástica para a determinação dos esforços referentes aos estados limites de serviço.

3.1.1.1 Fendilhação do betão

A fendilhação do betão sobre os apoios devida aos momentos flectores negativos é abordada no Subcapítulo 9.8.1 do EC4 - Parte 1.1, que por sua vez reencaminha o projectista para o Capítulo 7.3 do EC2 - Parte 1.1 que fornece as seguintes opções: determinação de uma armadura mínima de flexão sem cálculo directo, ou cálculo da largura de fendas no betão para verificar se esta excede ou não o limite pré-estabelecido.

Como se verá na Secção 3.1.2 do presente documento, existe a possibilidade de o projectista dimensionar uma laje mista contínua como uma sucessão de tramos simplesmente apoiados. Nesse caso o Subcapítulo 9.8.1 do EC4 - Parte 1.1 impõe uma quantidade mínima de armadura de flexão a dispor sobre os apoios, que corresponde a 0.4% ou 0.2% da secção da lajeta de betão, consoante se disponha ou não de escoramento durante o processo construtivo.

Para atender à retracção do betão e à distribuição de cargas pontuais deve ser usada na face superior da laje uma armadura mínima de 0.1% da secção da lajeta de betão em cada uma das direcções, com um mínimo de 0.80 cm²/m, por direcção (Subcapítulo 9.2.1 do EC4 - Parte 1.1).

As armaduras e/ou redes electrossoldadas a colocar serão, no mínimo, da classe A500 NR SD, posicionadas a 25 mm da superfície superior do betão.

3.1.1.2 Flecha

Esta verificação é abordada no Subcapítulo 9.8.2 do EC4 - Parte 1.1, que indica que o projectista tem duas possibilidades para controlar a flecha da laje em fase mista:

- a) Por via indirecta, recorrendo à razão l/d (l = vão, d = altura útil), cujos valores limite estão definidos na Tabela 7.4N do Subcapítulo 7.4.2 do EC2 - Parte 1.1 (considerar betão levemente solicitado, isto é, com $\rho=0.5\%$, sendo ρ a percentagem de armadura de flexão). Posteriormente recomenda-se que o projectista corrija o valor obtido na tabela multiplicando-o pela razão $k_{\sigma_s} = 310/\sigma_s$ (expressão 7.17), sendo σ_s a tensão na chapa perfilada (em MPa) ao nível do correspondente centro de gravidade, calculada para a combinação característica e considerando para a secção de betão a inércia fissurada. A secção transversal a usar para a chapa perfilada MUNDIDECK é a A (ver Fig. 2), correspondendo aproximadamente a um $\rho=0.5\%$ na maioria das lajes.
- b) Por via directa, calculando a flecha. Para o momento de inércia da secção de betão pode tomar-se a média dos momentos de inércia das secções não fissurada e fissurada. Para o coeficiente de homogeneização ($n=E_a/E_c$) adopta-se a média dos valores a curto prazo e a longo prazo. O EC4 - Parte 1.1 não estabelece limites máximos para as flechas, devendo o projectista impor limites adequados, ou basear-se no EC2 ou no EC3.

3.1.2 Estados Limites Últimos

Os Estados Limites Últimos em fase mista são tratados no Capítulo 9.7 do EC4 - Parte 1.1. O Subcapítulo 9.4.2 do EC4 - Parte 1.1 permite a utilização dos seguintes métodos de análise para os estados limites últimos:

- análise linear elástica;
- análise rígido-plástica global, desde que a secção tenha adequada ductilidade;
- análise elasto-plástica, tendo em conta o comportamento não-linear do material.

Dadas as propriedades muito próprias destas lajes o EC4 permite ainda:

- reduzir os momentos negativos elásticos nos apoios até 30%, aumentando os respectivos momentos positivos nos vãos adjacentes, desde que os efeitos da fendilhação do betão não tenham sido tidos em conta na determinação dos esforços de cálculo elásticos;
- usar uma análise plástica sem verificar a capacidade de rotação se o vão for inferior a 3 m e o aço das armaduras for da classe de ductilidade C (EC2 - Parte 1.1 - Anexo C);
- dimensionar uma laje contínua como uma sucessão de tramos simplesmente apoiados, desde que se coloque sobre os apoios intermédios uma armadura mínima de flexão (ver 3.1.1.1).

Nas combinações de acções devem ser consideradas as alternâncias de sobrecargas. A expressão base a aplicar em cada combinação é do tipo:

$$P_{Ed} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$$

sendo:

- P_{Ed} a carga de cálculo para verificação aos estados limites últimos em fase mista;
- $\gamma_G = 1.35$ o factor de segurança parcial relativo às acções permanentes;
- $\gamma_Q = 1.50$ o factor de segurança parcial relativo às acções variáveis;
- G_k o valor característico das acções permanentes;
- Q_k o valor característico das acções variáveis.

3.1.2.1 Momento flector positivo

O Subcapítulo 9.7.2 do EC4 - Parte 1.1 aborda a determinação de capacidade resistente de cálculo à flexão em fase mista, sendo que para momentos flectores positivos e para a chapa perfilada MUNDIDECK se aplica o seguinte procedimento, baseado na Fig. 7:

1. Determinação da profundidade do eixo neutro plástico (x_{pl}):

$$x_{pl} = \frac{A_p \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_a}}{\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b}$$

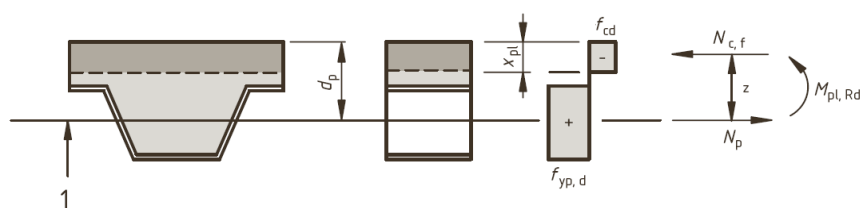
2. Determinação do momento flector resistente ($M_{pl,Rd}$):

$$M_{pl,Rd} = A_p \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_a} \cdot (d_p - 0.5x_{pl})$$

sendo:

- A_p a área da chapa perfilada (secção transversal C - ver Fig. 4);
- f_{yp} a resistência característica à tracção da chapa;
- γ_a o coeficiente parcial de segurança da chapa;
- f_{ck} a resistência característica do betão;
- γ_c o coeficiente parcial de segurança relativo ao betão;
- b a largura de laje em análise (normalmente 1 m);
- d_p a profundidade do centro de gravidade da chapa perfilada (ver Fig. 7).

A secção transversal a utilizar é a C (ver Fig. 4), pois corresponde à secção bruta da chapa perfilada retirando as bossas.



1 - eixo que passa pelo centro de gravidade da chapa perfilada

Fig. 7 - Distribuição de tensões para momentos positivos (e. l. último).

3.1.2.2 Momento flector negativo

No Subcapítulo 9.7.2 do EC4 - Parte 1.1 é referida a determinação da resistência de cálculo da laje mista aos momentos flectores negativos, desprezando para tal a contribuição da chapa perfilada. O procedimento a utilizar, baseado na Fig. 8, é o seguinte:

1. Determinação da profundidade do eixo neutro plástico (x_{pl}):

$$x_{pl} = \frac{A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s}}{\frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_c}$$

2. Determinação do momento flector resistente ($M_{pl,Rd}$):

$$M_{pl,Rd} = A_s \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \cdot (d_s - 0.5x_{pl})$$

sendo:

- A_s a área da armadura ordinária para momentos flectores negativos;
- f_{sk} a resistência característica à tracção da armadura ordinária;
- γ_s o coeficiente parcial de segurança relativo ao aço da armadura ordinária;
- b_c a largura das nervuras formadas a partir de um perfil MUNDIDECK (secção transversal C - ver Fig. 4);
- d_s a altura útil da armadura (ver Fig. 8).

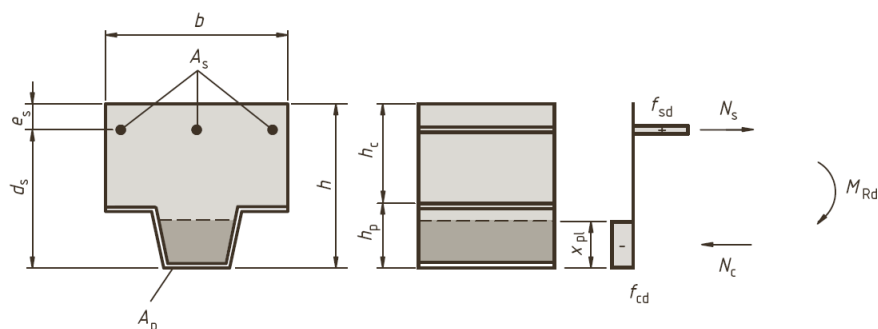


Fig. 8 - Distribuição de tensões para momentos positivos (e. l. último).

3.1.2.3 Esforço transversal

O Subcapítulo 9.7.5 do EC4 - Parte 1.1 remete para o Subcapítulo 6.2.2 do EC2 - Parte 1.1 a determinação da capacidade resistente de cálculo da laje mista ao esforço transversal. Tratando-se de um elemento sem armaduras de corte, a expressão da correspondente resistência de cálculo é:

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \geq v_{min} \cdot b_w \cdot d \quad [N]$$

onde:

- $C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c}$ é uma tensão de referência [MPa];
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$ [com d em mm];
- d é a altura útil da armadura de tracção [mm];
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0.02$;
- A_{sl} é área de armadura na zona traccionada [mm²];
- b_w é o somatório das larguras das nervuras (secção transversal D - ver Fig. 5);
- $v_{min} = 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$ [com f_{ck} em MPa].

A expressão acima indicada para determinação do esforço transversal resistente de cálculo não foi estabelecida para este tipo de lajes, em que a armadura inferior é muito distribuída e pouco aderente. Deve o projectista considerar para A_{sl} apenas a parte da secção transversal da chapa perfilada que contribui para a resistência ao esforço transversal, pelo que se recomenda o uso da secção transversal D (ver Fig. 5) na presença de momentos flectores positivos. Caso existam no interior das nervuras armaduras adicionais, como as da Fig. 17, estas poderão ser adicionadas à armadura da chapa perfilada. Sobre apoios intermédios (momentos flectores negativos) deve usar-se para A_{sl} a armadura ordinária de continuidade.

3.1.2.4 Esforço de corte longitudinal

O Subcapítulo 9.7.3 do EC4 - Parte 1.1 apresenta dois métodos para a determinação da resistência de cálculo ao esforço de corte longitudinal de uma laje mista: o método m-k e o método da conexão parcial. No presente documento apenas será usado o método m-k, a que está associada a seguinte expressão:

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

onde:

- $V_{l,Rd}$ é o esforço de corte longitudinal resistente de cálculo [N];
- b é a largura em análise [mm] (usualmente 1000 mm);
- d_p é a distância do centro de gravidade da chapa perfilada à superfície superior de betão [mm];
- $\gamma_{VS} = 1.25$ é o coeficiente parcial de segurança relativo à conexão;
- A_p é a área efectiva da secção transversal E da chapa perfilada [mm²] (ver Fig. 6);
- m e k são os parâmetros do método obtidos dos ensaios experimentais para o tipo de laje em estudo [N/mm²];
- L_s é o vão de corte [mm].

Segundo o EC4 o vão de corte L_s deve ser tomado como:

- A distância entre cada carga e o apoio mais próximo para duas cargas concentradas dispostas simetricamente;
- $L_s = L / 4$ para cargas uniformemente distribuídas e lajes simplesmente apoiadas de vão L . Refere ainda o EC4 que para lajes projectadas como contínuas pode ser usado $L_s = L' / 4$, em que: para vãos internos $L' = 0.8 \cdot L$ e para vãos externos $L' = 0.9 \cdot L$;
- Para outros carregamentos L_s deve ser baseado em ensaios, ou tomado como o cociente entre o momento flector máximo e o esforço transversal máximo junto aos apoios do vão considerado.

A secção transversal a utilizar é a secção transversal E (ver Fig. 6), dado que os parâmetros m e k foram obtidos dos ensaios laboratoriais realizados, nos quais se consideraram as propriedades mecânicas da secção transversal bruta da chapa perfilada.

3.1.2.5 Punçoamento

O Subcapítulo 9.7.6 do EC4 - Parte 1.1 remete para o Subcapítulo 6.4.4 do EC2 - Parte 1.1 a determinação da capacidade resistente de cálculo ao punçoamento de uma laje mista, que na secção de controlo de referência é dada por:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \geq v_{\min} \quad [\text{MPa}]$$

cujos símbolos foram já descritos na Secção 3.1.2.4, com excepção de ρ_l que nesta fórmula de cálculo, por o efeito do punçoamento ser bidimensional, toma a seguinte expressão:

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$$

O valor da máxima tensão de punçoamento actuante de cálculo v_{Ed} é igual a:

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{u_i \cdot d} \quad [\text{MPa}]$$

sendo:

- V_{Ed} o esforço de punçoamento actuante de cálculo no perímetro controlo [N];
- β um parâmetro que tem em conta a excentricidade de V_{Ed} em relação ao perímetro de controlo (consultar Subcapítulo 6.4.3 do EC2 - Parte 1.1).
- u_i o perímetro de controlo [mm];
- d a altura útil média da laje [mm].

O perímetro de controlo u_i é definido no Subcapítulo 9.7.6 do EC4 - Parte 1.1, tal como ilustrado na Fig. 9.

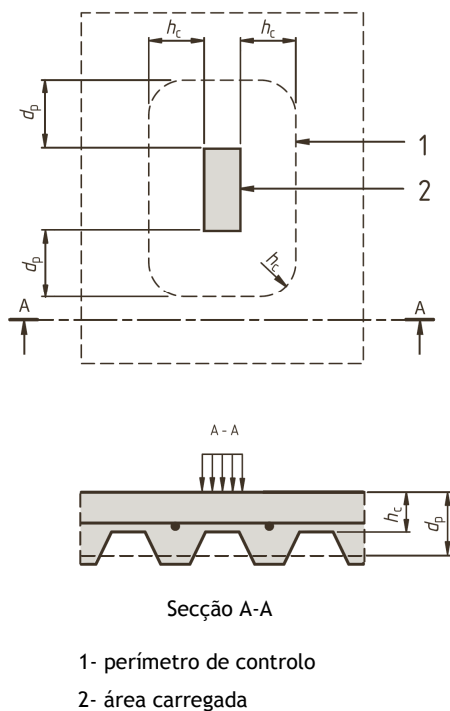


Fig. 9 - Perímetro de controlo para o punçoamento em lajes mistas.

3.2 Fase de cofragem

A verificação da segurança de uma chapa perfilada em fase de cofragem enquadra-se no âmbito do Eurocódigo 3, referente a estruturas metálicas. Inclui o controlo da flecha em Serviço e os esforços resistentes nos Estados Limites Últimos.

3.2.1 Estado Limite de Serviço

Para controlo da flecha em fase de cofragem deve ser cumprido o Capítulo 9.6 do EC4 - Parte 1.1.

3.2.2 Estados Limites Últimos

Para cada umas das verificações relativas aos estados limites últimos em fase de cofragem indicam-se os subcapítulos do EC3 - Parte 1.3 que permitem determinar os correspondentes esforços resistentes:

- Momentos flectores positivos e negativos: Subcapítulo 6.1.4.1 do EC3 - Parte 1.3;
- Esforço transversal: Subcapítulo 6.1.5 do EC3 - Parte 1.3;
- Forças transversais locais: Subcapítulo 6.1.7.3 do EC3 - Parte 1.3;
- Combinação do esforço transversal com momentos flectores: Subcapítulo 6.1.10 do EC3 - Parte 1.3;
- Combinação das forças transversais locais com momentos flectores: Subcapítulo 6.1.11 do EC3 - Parte 1.3.

Em relação aos métodos de análise, o Subcapítulo 9.4.1 do EC4 - Parte 1.1 reencaminha o projectista para o EC3 - Parte 1.3. Assinala-se que no Subcapítulo 9.4.1 do EC4 - Parte 1.1 o projectista é impedido de redistribuir os momentos flectores em fase de cofragem quando são usados escoramentos.

Na maioria das situações práticas estas verificações servem apenas para decidir a quantidade de escoramento a colocar, pelo que se optou por não as desenvolver extensivamente neste Capítulo. Contudo, no Capítulo 7 relativo aos exemplos práticos, tais verificações encontram-se suficientemente desenvolvidas.

4 TABELAS DE DIMENSIONAMENTO

4.1 Pressupostos

Em relação à elaboração de tabelas para apoio ao dimensionamento de lajes mistas foram adoptados os seguintes pressupostos:

- Em lajes contínuas considerou-se uma redução dos momentos flectores negativos sobre os apoios interiores igual a 30%;
- Os momentos flectores negativos sobre os apoios foram avaliados na secção da laje à face do apoio; supôs-se esta localizada a 5 cm do eixo do apoio;
- O máximo esforço transversal actuante de cálculo foi avaliado numa secção a uma distância da face interior do apoio igual à altura útil da laje; supôs-se igual a 15 cm o somatório da altura útil da laje com a distância da face interior do apoio ao eixo deste.
- Recobrimento das armaduras de continuidade: 25 mm (antes de qualquer revestimento);
- Betões de classe de resistência C20/25 e C30/37, e aço da classe de resistência A500 NR SD;
- Cargas permanentes adicionais (revestimentos, divisórias, etc.) são integradas na parcela da sobrecarga;
- Estados Limites considerados:
 - Estados Limites de Serviço: i) fendilhação do betão (largura de fendas na face superior da laje mista limitada a $w_k = 0.4$ mm, assumindo armaduras ordinárias com diâmetro $\varnothing = 10$ mm e recorrendo à Tabela 7.2N do EC2 - Parte 1.1); e ii) deformação da laje mista (através da limitação da razão l/d especificada no Subcapítulo 7.4 do EC2 - Parte 1.1);
 - Estados Limites Últimos: momentos flectores positivos e negativos, esforço transversal e esforço de corte longitudinal.

Em relação ao dimensionamento da chapa perfilada como cofragem foram admitidas as seguintes hipóteses:

- Cargas de construção: $Q_k = 1.75$ kN/m² (ver detalhe nos Exemplos 1 e 2 do Capítulo 7). Esta acção representa a sobrecarga adicional ao peso próprio da laje mista a considerar na fase de cofragem (EC1 - Parte 1.6, Subcapítulo 4.11.2);
- Condições de apoio da chapa perfilada no suporte: i) Categoria 2 ($\alpha=0.15$) (tal implica um apoio com pelo menos 100 mm) e ii) $l_a = 10$ mm (comprimento mínimo efectivo para efeitos de cálculo do apoio da laje mista no suporte) (Subcapítulo 6.1.7.3 do EC3 - Parte 1.3);
- Estados Limites considerados:
 - Estados Limites de Serviço (deformação): flecha limitada a $L/180$;
 - Estados Limites Últimos: momentos flectores, esforço transversal e forças transversais locais, eventualmente combinadas com os momentos flectores.

Na elaboração das tabelas para lajes contínuas partiu-se do princípio que os vãos são aproximadamente iguais, e considerou-se que existe uma continuidade física da chapa perfilada nos apoios intermédios. Foi considerada a alternância de sobrecargas.

Uma vez que nas lajes contínuas as resistências ao momento flector negativo e ao esforço transversal são condicionadas pela classe de resistência do betão, para estas lajes foram elaborados dois tipos de tabelas, correspondentes às duas classes de resistência C20/25 e C30/37.

4.2 Tabelas de dimensionamento directo

As variáveis para a escolha da tabela a aplicar a um determinado caso concreto de uma laje mista são: a espessura da chapa perfilada, o sistema estático da laje (simplesmente apoiada ou contínua) e a classe de betão. Para a definição completa da laje mista é necessário determinar a respectiva espessura total, que é obtida após consulta da tabela correspondente.

Nas tabelas apresentadas nas subsecções seguintes, tal como nos Exemplos do Capítulo 7 será utilizada uma designação própria para cada tipo de laje. A designação a utilizar será do tipo:

MD/e.e/S/cc/Hhh


em que:

- MD: refere-se à chapa perfilada MUNDIDECK da marca MUNDIPERFIL;
- e.e é a espessura da chapa perfilada [mm];
- S indica o sistema estático da laje (A: simplesmente apoiada; C: contínua)
- cc: indica a classe de resistência do betão utilizada [MPa];
- H: assinala que a seguir se vai indicar a espessura total da laje mista;
- hh: é a espessura total da laje mista [cm].

Por exemplo, a laje MD/1.0/A/30/H18 refere-se a uma laje mista com chapa perfilada MUNDIDECK da marca MUNDIPERFIL de 1.0 mm de espessura, com uma espessura total de 18 cm, cujo sistema estático é simplesmente apoiado, sendo utilizado um betão da classe de resistência C30/37.

4.2.1 Lajes mistas com chapa perfilada de espessura $e = 0.8$ mm

Tabela 12 - Lajes simplesmente apoiadas com chapa perfilada de espessura $e = 0.8$ mm.

MD/0.8/A/20								C20/25	
L [m]	H [cm]								
	12	13	14	15	16	18	20		
1.4	22.1	23.4	24.6	25.9	27.1	29.4	31.6		
1.6	19.1	20.2	21.3	22.3	23.3	25.3	27.2		
1.8	16.7	17.7	18.6	19.6	20.4	22.1	23.7		
2.0	14.8	15.7	16.5	17.3	18.1	19.6	21.0	↓	
2.2	12.1	13.6	14.8	15.5	16.2	17.5	18.7		
2.4	10.1	11.3	12.6	13.8	14.6	15.8	16.9		
2.6	8.5	9.5	10.6	11.6	12.7	14.3	15.3		
2.8	7.2	8.1	9.0	9.9	10.8	12.6	13.9		
3.0	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.8	12.3		
3.2	5.0	6.0	6.6	7.3	7.9	9.3	10.6		
3.4	3.8	5.0	5.7	6.3	6.9	8.0	9.1		
3.6	2.9	3.8	4.9	5.5	6.0	6.9	7.9		
3.8	2.1	2.9	3.7	4.7	5.2	6.0	6.9		
4.0	-	2.1	2.8	3.6	4.5	5.3	6.0		
4.2	-	-	2.1	2.7	3.5	4.6	5.2	↓↓	
4.4	-	-	-	-	2.6	4.0	4.6		
4.6	-	-	-	-	-	3.1	4.0		
4.8	-	-	-	-	-	2.3	3.4		
5.0	-	-	-	-	-	-	2.7		

L - Distância entre apoios [m]

H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):

- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd},c}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{\text{l},\text{Rd}}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd}^-)

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)





-  Não necessita de escoramento
-  Necessidade de uma linha de escoramento
-  Necessidade de duas linhas de escoramento
-  Necessidade de três linhas de escoramento

Tabela 13 - Lajes contínuas com chapa perfilada de espessura $e = 0.8$ mm e betão C20/25.

MD/0.8/C/20		C20/25					
L [m]	H [cm]						
	12	13	14	15	16	18	20
1.4	16.0	17.8	19.6	21.4	23.1	26.7	30.2
1.6	13.6	15.1	16.6	18.1	19.6	22.6	25.5
1.8	11.8	13.0	14.2	15.5	16.8	19.4	21.9
2.0	11.1	11.4	12.4	13.5	14.6	16.9	19.1
2.2	10.6	10.8	11.1	11.9	12.9	14.8	16.8
2.4	10.2	10.4	10.6	10.8	11.4	13.1	14.9
2.6	10.0	10.0	10.1	10.3	10.4	11.7	13.3
2.8	8.7	9.7	9.8	9.9	10.0	10.5	11.9
3.0	7.2	8.8	9.5	9.5	9.6	9.8	10.8
3.2	6.0	7.7	8.5	9.3	9.3	9.4	9.8
3.4	5.1	6.5	7.4	8.2	8.9	9.1	9.3
3.6	4.3	5.5	6.5	7.2	7.8	8.8	8.9
3.8	3.6	4.7	5.7	6.3	6.9	8.0	8.6
4.0	3.0	4.0	5.0	5.6	6.1	7.1	8.1
4.2	2.5	3.4	4.3	4.9	5.4	6.3	7.2
4.4	2.1	2.9	3.7	4.4	4.8	5.6	6.4
4.6	-	2.4	3.2	3.9	4.2	5.0	5.7
4.8	-	-	2.7	3.4	3.8	4.4	5.0
5.0	-	-	2.1	2.7	3.4	3.9	4.5

L - Distância entre apoios [m] H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):

- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd,c}}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{\text{l,Rd}}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd})

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)

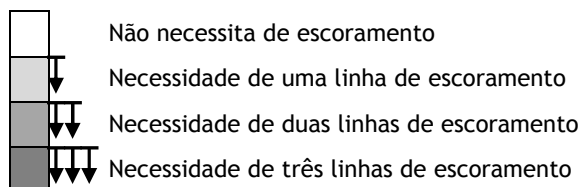



Tabela 14 - Lajes contínuas com chapa perfilada de espessura $e = 0.8$ mm e betão C30/37.

MD/0.8/C/30								C30/37
L [m]	H [cm]							
	12	13	14	15	16	18	20	
1.4	20.1	22.3	24.5	26.7	29.0	33.4	37.8	
1.6	17.1	18.9	20.8	22.7	24.6	28.4	32.1	
1.8	14.7	16.3	18.0	19.6	21.2	24.5	27.7	
2.0	13.8	14.3	15.7	17.1	18.6	21.4	24.2	
2.2	13.1	13.5	13.9	15.1	16.4	18.9	21.4	
2.4	12.5	12.9	13.2	13.6	14.6	16.8	19.1	
2.6	10.6	11.9	12.6	12.9	13.2	15.1	17.1	
2.8	9.1	10.2	11.3	12.4	12.6	13.6	15.5	
3.0	7.8	8.8	9.8	10.8	11.7	12.6	14.0	
3.2	6.8	7.7	8.5	9.3	10.2	11.9	12.8	
3.4	5.9	6.7	7.4	8.2	8.9	10.4	11.9	
3.6	5.2	5.9	6.5	7.2	7.8	9.1	10.4	
3.8	4.6	5.2	5.7	6.3	6.9	8.0	9.2	
4.0	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1	7.1	8.1	
4.2	3.3	4.0	4.5	4.9	5.4	6.3	7.2	
4.4	2.6	3.4	4.0	4.4	4.8	5.6	6.4	
4.6	-	2.7	3.5	3.9	4.2	5.0	5.7	
4.8	-	-	2.7	3.5	3.8	4.4	5.0	
5.0	-	-	2.1	2.8	3.4	3.9	4.5	

L - Distância entre apoios [m]

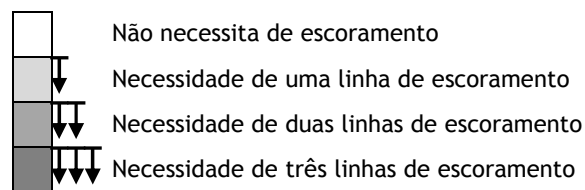
H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):


- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd},c}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{l,Rd}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd})

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)



4.2.2 Lajes mistas com chapa perfilada de espessura $e = 1.0$ mm

Tabela 15 - Lajes simplesmente apoiadas com chapa perfilada de espessura $e = 1.0$ mm.

MD/1.0/A/20								C20/25	
L [m]	H [cm]								
	12	13	14	15	16	18	20		
1.4	23.9	25.4	26.8	28.1	29.5	32.0	34.4		
1.6	20.7	21.9	23.1	24.3	25.4	27.6	29.6		
1.8	18.2	19.3	20.3	21.3	22.3	24.1	25.9		
2.0	16.2	17.1	18.0	18.9	19.8	21.4	23.0		
2.2	13.9	15.4	16.2	17.0	17.7	19.2	20.5		
2.4	11.5	12.9	14.4	15.3	16.0	17.3	18.5		
2.6	9.6	10.8	12.0	13.2	14.4	15.7	16.8		
2.8	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	14.2	15.3		
3.0	6.9	7.7	8.6	9.5	10.3	12.0	13.8		
3.2	5.9	6.6	7.3	8.1	8.8	10.3	11.8		
3.4	5.0	5.7	6.3	6.9	7.6	8.8	10.1		
3.6	4.2	4.9	5.4	6.0	6.5	7.6	8.7		
3.8	3.2	4.2	4.7	5.2	5.6	6.6	7.5		
4.0	2.5	3.2	4.0	4.5	4.9	5.7	6.5		
4.2	-	2.5	3.2	3.9	4.2	4.9	5.6		
4.4	-	-	2.5	3.2	3.6	4.2	4.9		
4.6	-	-	-	2.4	3.1	3.7	4.2		
4.8	-	-	-	-	2.4	3.1	3.6		
5.0	-	-	-	-	-	2.7	3.1		

L - Distância entre apoios [m]

H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):

- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd},c}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{\text{l},\text{Rd}}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd}^-)

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)

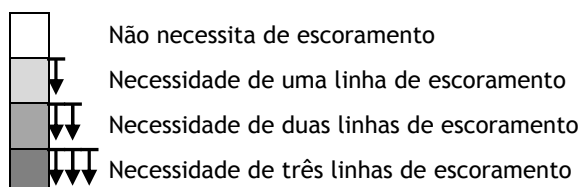


Tabela 16 - Lajes contínuas com chapa perfilada de espessura $e = 1.0$ mm e betão C20/25.

MD/1.0/C/20								C20/25	
L [m]	H [cm]								
	12	13	14	15	16	18	20		
1.4	16.0	17.8	19.6	21.3	23.1	26.6	30.2		
1.6	13.6	15.1	16.5	18.0	19.5	22.5	25.5		
1.8	11.8	12.9	14.2	15.5	16.8	19.4	21.9		
2.0	11.1	11.4	12.4	13.5	14.6	16.8	19.1		
2.2	10.6	10.8	11.1	11.9	12.8	14.8	16.8	↓	
2.4	10.2	10.3	10.5	10.7	11.4	13.1	14.9		
2.6	10.0	10.0	10.1	10.3	10.4	11.7	13.3		
2.8	8.7	9.7	9.8	9.8	10.0	10.5	11.9		
3.0	7.2	9.1	9.5	9.5	9.6	9.8	10.8		
3.2	6.0	7.7	9.4	9.3	9.3	9.4	9.8		
3.4	5.1	6.5	8.1	9.1	9.0	9.1	9.2		
3.6	4.2	5.5	6.9	7.9	8.6	8.8	8.9		
3.8	3.6	4.6	5.8	6.9	7.6	8.6	8.6		
4.0	3.0	3.9	5.0	6.1	6.6	7.8	8.4		
4.2	2.5	3.3	4.3	5.3	5.9	6.8	7.8	↓↓	
4.4	2.1	2.8	3.7	4.6	5.2	6.0	6.9		
4.6	-	2.4	3.1	4.0	4.6	5.3	6.1		
4.8	-	-	2.7	3.4	4.0	4.7	5.4		
5.0	-	-	2.3	2.9	3.5	4.1	4.7		

L - Distância entre apoios [m]

H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):

- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd},c}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{l,Rd}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd^-})

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)

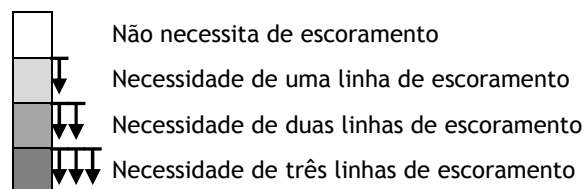



Tabela 17 - Lajes contínuas com chapa perfilada de espessura $e = 1.0$ mm e betão C30/37.

MD/1.0/C/30								C30/37	
L [m]	H [cm]								
	12	13	14	15	16	18	20		
1.4	20.1	22.3	24.5	26.7	28.9	33.4	37.8		
1.6	17.0	18.9	20.8	22.7	24.6	28.3	32.1		
1.8	14.7	16.3	18.0	19.6	21.2	24.4	27.7		
2.0	13.8	14.3	15.7	17.1	18.5	21.4	24.2		
2.2	13.1	13.5	13.9	15.1	16.4	18.9	21.4		
2.4	12.5	12.9	13.2	13.5	14.6	16.8	19.0		
2.6	12.1	12.3	12.6	12.9	13.2	15.1	17.1		
2.8	10.3	11.6	12.1	12.4	12.6	13.6	15.4		
3.0	8.8	9.9	11.0	11.9	12.1	12.6	14.0		
3.2	7.6	8.6	9.5	10.5	11.4	12.1	12.8		
3.4	6.6	7.4	8.3	9.1	9.9	11.6	11.9		
3.6	5.8	6.5	7.2	7.9	8.6	10.1	11.5		
3.8	5.0	5.7	6.3	6.9	7.6	8.8	10.1		
4.0	4.4	5.0	5.5	6.1	6.6	7.8	8.9		
4.2	3.9	4.4	4.9	5.4	5.9	6.8	7.8		
4.4	3.4	3.9	4.3	4.7	5.2	6.0	6.9		
4.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.6	5.3	6.1		
4.8	2.4	3.0	3.3	3.7	4.0	4.7	5.4		
5.0	-	2.5	2.9	3.2	3.5	4.1	4.7		

L - Distância entre apoios [m]

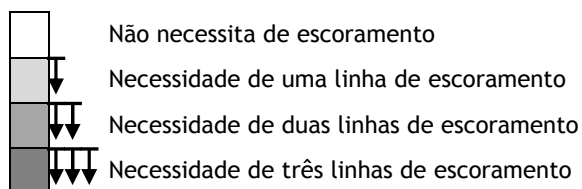
H - Espessura total da laje [cm]

Os valores presentes na tabela (em kN/m^2) representam o valor característico da totalidade das acções adicionais ($G_{\text{rev}} + Q_k$) a aplicar na laje mista para além do seu peso próprio (G_{pp}), ou seja, revestimentos, paredes divisórias, sobrecargas e outras acções variáveis.

Factores que condicionam o dimensionamento:
(fase mista) (de acordo com a cor do valor da carga na tabela):

- x.x - Esforço transversal vertical ($V_{\text{Rd},c}$)
- x.x - Esforço de corte longitudinal ($V_{\text{l},\text{Rd}}$)
- x.x - Flecha em serviço (l/d)
- x.x - Momento negativo de continuidade (M_{Rd})

Necessidade de escoramento:
(fase de cofragem)



4.2.3 Armaduras de distribuição (A500 NR SD)

A armadura mínima de distribuição A_s^{dist} a colocar na laje mista em cada direcção (ver Fig. 15) consta da Tabela 18.

Tabela 18 - Armadura de distribuição a dispor em cada direcção.

H [cm]	12	13	14	15	16	18	20
A_s^{dist} [cm ² /m]	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4

4.2.4 Armaduras ordinárias de continuidade (Ø10, A500 NR SD)

Em lajes mistas contínuas a armadura ordinária a dispor na face superior para absorver os momentos flectores negativos sobre os apoios (A_s^-) (ver Fig. 16) é apresentada na Tabela 19. Os valores das áreas de armadura ordinária de continuidade presentes na Tabela 19 representam os valores máximas obtidos nos cálculos em cada uma das colunas das tabelas de dimensionamento directo apresentadas em 4.2.1 e 4.2.2 para as lajes mistas contínuas. No entanto, poderá o projectista calcular a armadura ordinária de continuidade para a sua laje específica com o objectivo de obter uma armadura menor do que a da Tabela 19.

Tabela 19 - Armadura para absorver os momentos flectores negativos nos apoios de continuidade.

H [cm]		12	13	14	15	16	18	20
A_s^- [cm ² /m]	e = 0.8 mm	3.5	3.5	3.9	4.2	4.3	4.3	4.9
	e = 1.0 mm	4.0	4.0	4.0	4.3	4.4	4.4	4.9

5 DISPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS PARA AS LAJES MISTAS

O EC4 - Parte 1.1 impõe alguns limites ao nível da secção de betão e das condições de apoio da chapa perfilada para uma correcta utilização de uma laje mista aço-betão. Essas disposições construtivas são sintetizadas em continuação.

5.1 Espessuras mínimas

Em relação à secção transversal das lajes mistas são definidas as seguintes espessuras mínimas:

- Para lajes mistas sem funções de contraventamento: espessura mínima de betão de 40 mm acima da chapa perfilada e espessura total mínima da laje mista de 80 mm (ver Fig. 10).

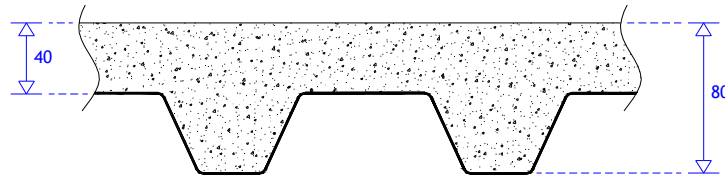


Fig. 10 - Espessuras mínimas [mm] da secção transversal de uma laje mista sem funções de contraventamento.

- Para lajes mistas com funções de diafragma: espessura mínima de betão de 50 mm acima da chapa perfilada e espessura total mínima da laje mista de 90 mm (ver Fig. 11).

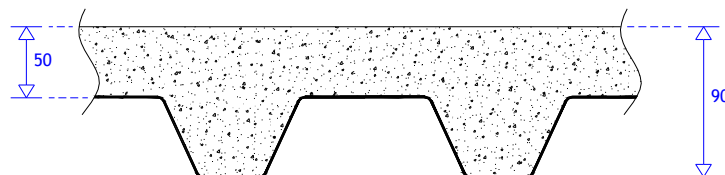


Fig. 11 - Espessuras mínimas [mm] da secção transversal de uma laje mista com funções de diafragma.

5.2 Condições de apoio

Ao nível das condições de apoio da chapa perfilada são definidas as seguintes distâncias mínimas:

- Apoio em vigas de aço ou de betão armado: distância mínima de apoio da chapa perfilada na viga de 50 mm e distância total mínima de apoio da laje mista na viga de 75 mm (ver Fig. 12 e Fig. 13).

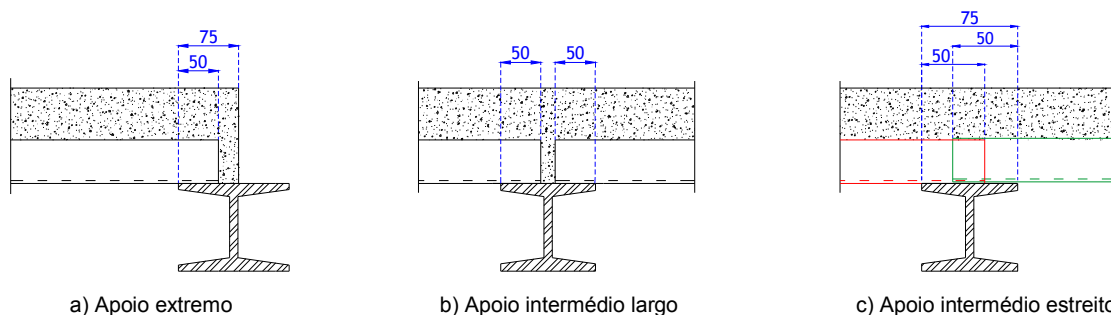


Fig. 12 - Distâncias mínimas [mm] de apoio em vigas metálicas.

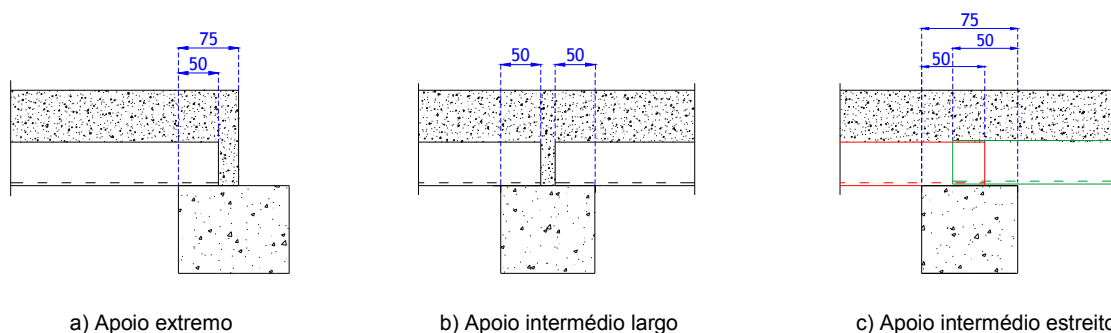


Fig. 13 - Distâncias mínimas [mm] de apoio em vigas de betão armado.

- Para apoio em vigas de outros materiais: distância mínima de apoio da chapa perfilada na viga de 70 mm e distância total mínima de apoio da laje mista na viga de 100 mm (ver Fig. 14).

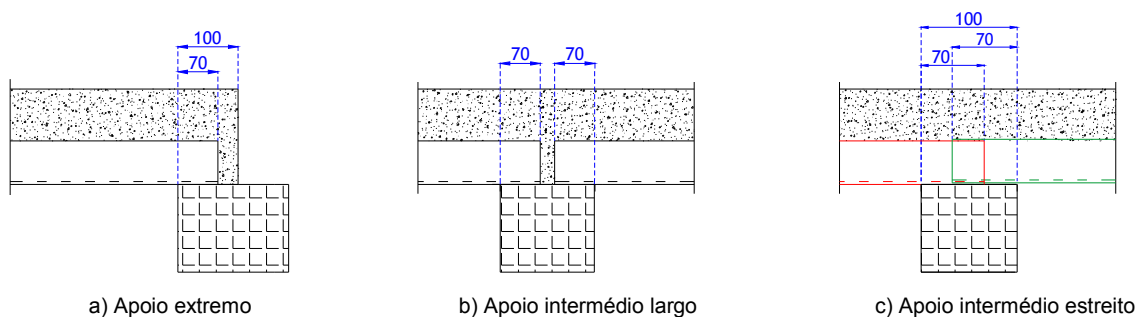


Fig. 14 - Distâncias mínimas [mm] de apoio em vigas de outros materiais.

5.3 Armaduras

No reforço do betão podem ser necessárias armaduras com diversas finalidades:

- Armadura de distribuição - é requerida em cada direcção uma armadura para atender à retracção do betão e à distribuição de cargas pontuais, que deve ser colocada a 25 mm da superfície superior de betão (ver Fig. 15) e pode ser consultada na Tabela 18.

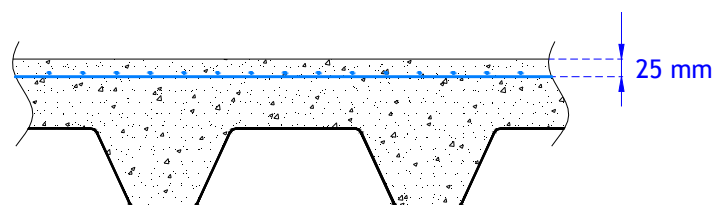


Fig. 15 - Armadura de distribuição.

- Armadura de continuidade - destinada a garantir a continuidade e a limitar a fendilhação sobre os apoios intermédios (momentos flectores negativos). Para vãos consecutivos, de comprimentos aproximadamente iguais, a armadura de continuidade deve ser prolongada para além do eixo do apoio em cerca de 30% do vão, colocada a uma profundidade de 25 mm (ver Fig. 16) e pode ser consultada na Tabela 19.

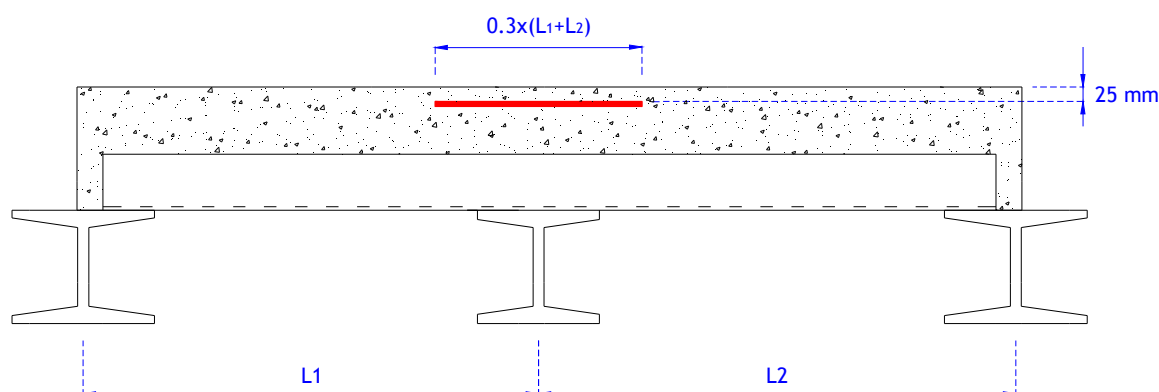


Fig. 16 - Disposição da armadura de continuidade sobre os apoios intermédios para vãos aproximadamente iguais.

- Armadura adicional no vão - a meio vão para um aumento de resistência aos momentos flectores positivos. Neste caso as armaduras podem ainda ser necessárias para satisfazer o estado limite de resistência ao fogo. Caso existam, devem ser colocadas centradas nas respectivas nervuras e elevadas 30 mm em relação à chapa perfilada (ver Fig. 17), podendo ser interrompidas na zona dos apoios.

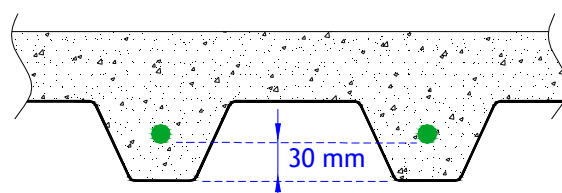


Fig. 17 - Disposição da armadura adicional no vão.

Na Fig. 18 representam-se esquematicamente as três armaduras mencionadas.

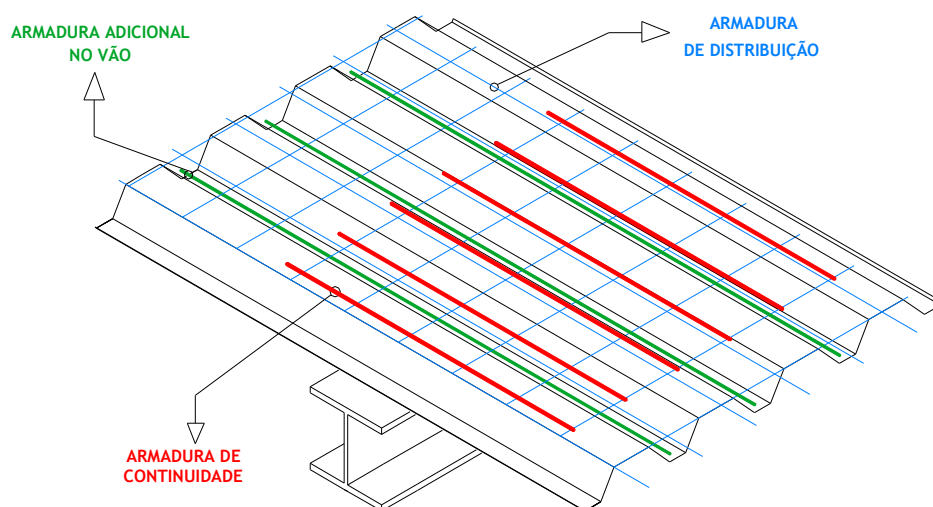


Fig. 18 - Disposição esquemática das armaduras em lajes mistas.

5.4 Fixações das chapas perfiladas aos apoios

As chapas perfiladas devem ser fixadas em todos os apoios definitivos. No mínimo, deve existir uma fixação por cada duas nervuras de chapa perfilada (ver Fig. 19). Contudo, fica ao critério do projectista a definição destas fixações, tendo em conta as cargas de construção previstas e essencialmente a acção do vento. No caso de apoio em vigas metálicas é corrente o uso de conectores e de parafusos auto-roscantes para a execução destas fixações. Para apoio em vigas de betão executadas em fase prévia também é corrente o uso de parafusos auto-roscantes; caso a betonagem das vigas e das lajes mistas seja simultânea a chapa perfilada terá de ser fixada à cofragem das vigas através de elementos removíveis após a betonagem, que não deverão danificar a laje mista.

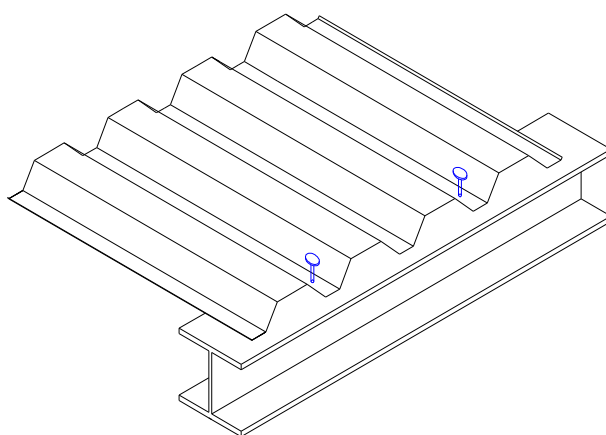


Fig. 19 - Fixação das chapas perfiladas aos apoios (usando conectores soldados).

5.5 Escoramento das chapas perfiladas

A Fig. 20 ilustra a largura mínima de apoio das chapas perfiladas em escoramentos provisórios (80 mm).

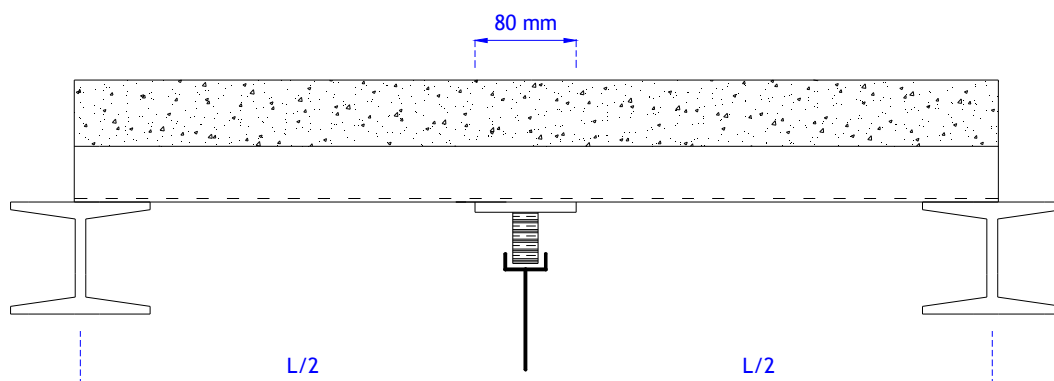


Fig. 20 - Apoio das chapas perfiladas em escoramentos provisórios (uma linha de escoramento representada).

Na fase de betonagem é necessário garantir que as extremidades da laje mista sejam preparadas, para evitar a fuga do betão e assegurar uma correcta vibração deste. É corrente o uso de remates de chapa metálica adequados à geometria específica das nervuras da laje mista.

6 INDICAÇÕES COMPLEMENTARES

6.1 Aumento da resistência ao corte longitudinal

Em lajes mistas com mais de 2 m de vão a carga que pode ser aplicada à laje é frequentemente limitada pela resistência ao esforço de corte longitudinal mobilizável na interface chapa-betão. Esta limitação pode, no entanto, ser ultrapassada mediante a colocação de conectores tipo perno com cabeça nas extremidades do vão, soldados através da chapa perfilada às vigas metálicas de apoio (ver Fig. 21). Soluções recorrendo a outro tipo de conectores são também viáveis.

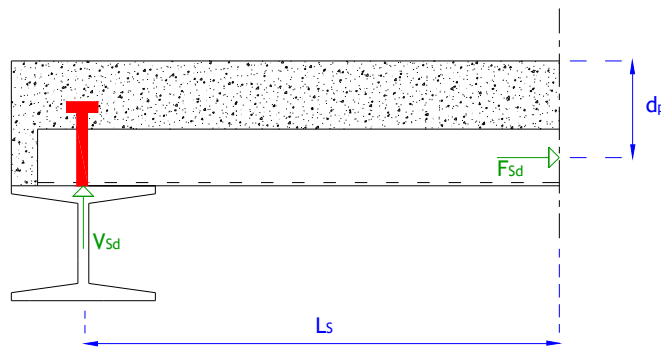


Fig. 21 - Conector tipo perno na extremidade.

No Subcapítulo 9.7.4 do EC4 - Parte 1.1 é exposto que os referidos conectores devem ser dimensionados para uma força de corte igual à força instalada na chapa perfilada em estado limite último.

6.2 Protecção ao fogo

O EC4 - Parte 1.2 estabelece no Subcapítulo 2.1.2 os seguintes critérios de verificação ao fogo: E (integridade), I (isolamento) e R (resistência mecânica). De acordo com o Subcapítulo 4.3.2 do EC4 - Parte 1.2, as lajes mistas sem protecção especial ao fogo e desde que dimensionadas de acordo com o EC4 - Parte 1.1, como é o caso das lajes executadas com a chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL, apresentam uma resistência ao fogo de pelo menos 30 minutos quando se usa o critério R.

No caso de se pretender adoptar lajes mistas com resistência ao fogo superior a 30 minutos (critério R) poder-se-á recorrer a uma ou mais das seguintes medidas:

- Colocação de armaduras de betão armado no interior das nervuras e com a protecção oferecida pelo betão (ver Fig. 17);
- Adopção de protecções na face inferior da chapa perfilada através de:
 - Tectos falsos adequados (por exemplo, com recurso a placas de gesso cartonado);
 - Projecção de argamassa (ou betão);
 - Pintura com tinta intumescente.

6.3 Isolamento acústico

A avaliação do desempenho acústico das lajes mistas executadas com chapa perfilada MUNDIDECK da MUNDIPERFIL foi efectuada recorrendo a modelos de simulação do comportamento acústico de lajes em geral. Assim sendo, os resultados obtidos não são mais do que estimativas do respectivo desempenho acústico, orientadoras da selecção e cálculo deste tipo de produtos.

Tanto o isolamento a sons de percussão como a absorção sonora são correntes para as características de massa e revestimento apresentadas. Entendeu-se assim subdividir o comportamento acústico segundo duas perspectivas:

- Solução simples (apenas a laje mista);
- Solução composta, em que além da laje mista é adoptada uma laje flutuante e/ou um tecto falso complementares.

6.3.1 Solução simples

A redução sonora a sons aéreos é descrita pelo índice de redução sonoro a sons aéreos - R_w (NP EN 20140-3:1998), de que se apresenta na Tabela 20 a estimativa de variação em função da espessura total da laje.

Tabela 20 - Estimativa do índice de redução sonoro a sons aéreos - R_w .

H [cm]	12	14	16	18	20
R_w [dB]	45	48	50	52	53
Incerteza do modelo de cálculo para intervalo de confiança de 95%	± 1.5	± 1.7	± 2.1	± 2.5	± 2.9

O isolamento sonoro a sons de percussão do sistema simples deve ser considerado apenas como referencial, pois para potenciar esta característica acústica deve-se recorrer a uma solução composta. É descrito pelo índice de isolamento sonoro a sons de percussão - L_{nw} (NP EN ISO 140-6:2000), de que se apresenta na Tabela 21 a estimativa de variação em função da espessura total da laje.

Tabela 21 - Estimativa do índice de isolamento sonoro a sons de percussão - L_{nw} .

H [cm]	12	14	16	18	20
L_{nw} [dB]	75	72	69	67	67
Incerteza do modelo para intervalo de confiança de 95%	± 2.6	± 1.9	± 1.1	± 0.9	± 0.8

A absorção sonora do sistema simples - α_{Sabine} - retrata apenas as características das superfícies de acabamento, ou seja superiormente o betão afagado e inferiormente a chapa lacada rigidamente apoiada. Os valores apresentados na Tabela 22 foram adaptados de ensaios publicados, e expressam a absorção sonora média das frequências centrais de banda de oitava de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz - $\alpha_{\text{Sabine media}}$.

Tabela 22 - Absorção sonora - α_{Sabine} .

	Betão afagado	Chapa lacada rigidamente apoiada
$\alpha_{\text{Sabine media}}$	0.05	0.03

6.3.2 Solução composta

A solução composta permite, sob o ponto de vista acústico, potenciar o comportamento deste sistema, quer ao nível da redução sonora a sons aéreos e de percussão, quer ao nível da absorção sonora. Os valores do incremento de desempenho acústico foram calculados com base em especificações correntes, e destinam-se apenas a dar indicação do potencial de desempenho acústico deste tipo de lajes mistas e soluções complementares.

Na Tabela 23 apresentam-se estimativas dos acréscimos da solução composta relativamente à solução simples caracterizada nas tabelas anteriores.

Tabela 23 - Incremento de desempenho acústico.

	ΔR_w [dB]	ΔL_{nw} [dB]	$\Delta \alpha_{\text{Sabine media}}$
a) Lajeta flutuante de betonilha armada com fibra de vidro sobre elemento resiliente com atravancamento total de 10cm.	5	18	0.40 (alcatifa)
b) Tecto falso à base de gesso cartonado com caixa de ar não inferior a 15cm dotada de manta fonoabsorvente.	8	9	0.70 (fibras projectadas)
a) + b) Aplicação simultânea das soluções acima referidas: lajeta flutuante e tecto falso.	10	22	0.40 (alcatifa) 0.70 (fibras projectadas)

7 EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO

Os exemplos que se seguem destinam-se a ilustrar o dimensionamento de lajes mistas executadas com chapas perfiladas MUNDIDECK da MUNDIPERFIL. Para o efeito considerou-se que num edifício industrial se pretendiam construir as seguintes lajes mistas:

- Uma laje simplesmente apoiada com 4.0 m de vão, sujeita a uma carga permanente adicional de 2.5 kN/m² (revestimentos e paredes divisórias) e uma sobrecarga de utilização de 2.0 kN/m² (Exemplo 1);
- Uma laje contínua com dois tramos iguais, cada com 4.0 m, submetida a uma carga permanente adicional de 1.0 kN/m² (revestimentos) e uma sobrecarga de utilização de 5.0 kN/m² (Exemplo 2).

O betão a utilizar será da classe C30/37 e o aço da classe A500 NR SD.

7.1 Exemplo 1: Laje mista simplesmente apoiada

As tabelas de dimensionamento partem do princípio que toda a carga adicional ao peso próprio da laje é adicionada à sobrecarga. Neste exemplo existem revestimentos e paredes divisórias. Para se obterem das tabelas valores coerentes deve-se multiplicar as cargas permanentes adicionais por um factor $\gamma_G / \gamma_Q = 1.35 / 1.50$, resultando numa sobrecarga “aparente” com o valor total: $2.5 \times 1.35 / 1.5 + 2.0 = 4.25 \text{ kN/m}^2$.

De acordo com as tabelas de dimensionamento da Secção 4.2, poderia ser utilizada: i) uma laje de 16 cm de espessura total com uma chapa perfilada de espessura $e = 0.8 \text{ mm}$, tipo MD/0.8/A/30/H16 (ver Tabela 12), ou ii) uma laje de 15 cm de espessura total com uma chapa perfilada de espessura $e = 1.0 \text{ mm}$, tipo MD/1.0/A/30/H15 (ver Tabela 15). As referidas tabelas indicam, em qualquer dos casos, a necessidade de uma linha de escoramento na fase de cofragem.

Dado tratar-se de um caso corrente (sem limitação especial de flechas e fendilhação) é possível, com os valores indicados nas tabelas, considerar a estrutura dimensionada. No entanto, o projectista poderá também encarar os valores das tabelas como indicativos, efectuando então todas as verificações referidas no Capítulo 3 deste documento. A título ilustrativo procede-se em seguida às verificações a realizar, e que permitem justificar as conclusões que acabam de ser obtidas apenas com recurso às tabelas, para o caso da laje MD/1.0/A/30/H15.

7.1.1 Fase mista: dimensionamento da laje (MD/1.0/A/30/H15)

7.1.1.1 Estados Limites de Serviço

Fendilhação do betão

A armadura de distribuição pode ser consultada na Tabela 18: $A_{s,dist} = 0.9 \text{ cm}^2/\text{m}$

Flecha

De acordo com a Secção 3.1.1.2 a flecha poderá ser verificada através da comparação da razão l/d com um valor limite. No Subcapítulo 7.4.2 do EC2 - Parte 1.1 encontra-se $(l/d)_0 \leq 20$. Conforme referido na Secção 3.1.1.2 este valor será corrigido pelo factor $k_{\sigma_s} = 310/\sigma_s$.

Dados:

$$l = 4.0 \text{ m} = 400 \text{ cm}$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$y_G = 3.04 \text{ cm (altura do centro de gravidade da secção transversal A, ver Tabela 2)}$$

$$d = h_t - y_G = 15 - 3.04 = 11.96 \text{ cm}$$

$$x_C = 4.21 \text{ cm (profundidade do eixo neutro da secção mista fissurada, ver Tabela 11)}$$

$$I_{cc} = 679 \text{ cm}^4/\text{m (inércia da secção mista fissurada, ver Tabela 11)}$$

Cálculos (combinação característica):

$$\left(\frac{l}{d}\right) = \frac{400}{11.96} = 33.4$$

$$p = G_k + Q_k = (2.9 + 2.5) + 2.0 = 7.4 \text{ kN/m}^2 \text{ (ver Tabela 7)}$$

$$M^+ = 0.125 \cdot p \cdot l^2 = 0.125 \times 7.4 \times 4.0^2 = 14.8 \text{ kN.m/m}$$

$$\sigma_s = \frac{M^+}{I_{cc}} \cdot (d - x_C) = \frac{14.8}{679 \times 10^{-8}} \times \frac{(11.96 - 4.21)}{100} = 168925 \text{ kPa} = 169 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_s} = \frac{310}{\sigma_s} = \frac{310}{169} = 1.83$$

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{lim} = \left(\frac{l}{d}\right)_0 \cdot k_{\sigma_s} = 20 \times 1.83 = 36.6$$

Verificação:

$$33.4 \leq 36.6 \quad \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.1.1.2 Estados Limites Últimos

De acordo com a Secção 3.1.2 as cargas a utilizar são:

$$G_k = 2.9 + 2.5 = 5.4 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = 2.0 \text{ kN/m}^2$$

A carga total actuante de cálculo vem:

$$p_{Ed} = 1.35 \times 5.4 + 1.5 \times 2.0 = 10.3 \text{ kN/m}^2$$

Os momentos flectores e os esforços transversos actuantes de cálculo foram obtidos para uma faixa de 1m de largura de laje (Fig. 22 a Fig. 24):

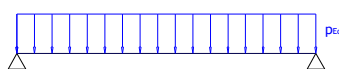


Fig. 22 - Carga de cálculo aplicada.



Fig. 23 - Momentos flectores actuantes de cálculo [kN.m/m].

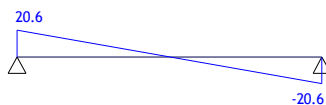


Fig. 24 - Esforços transversos actuantes de cálculo [kN/m].

Assim tem-se: $M_{Ed} = 20.6 \text{ kN.m/m}$ e $V_{Ed} = 20.6 \text{ kN/m}$.

Momento flector positivo

Dados:

$$A_p = 9.30 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (secção transversal C, ver Tabela 4)}$$

$$f_{yp} = 320 \text{ MPa}$$

$$\gamma_a = 1.00$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c = 1.5$$

$$b = 1.0 \text{ m}$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$y_G = 4.04 \text{ cm} \text{ (secção transversal C, ver Tabela 4)}$$

$$d_p = h_t - y_G = 15 - 4.04 = 10.96 \text{ cm}$$

Determinação do momento flector positivo resistente de cálculo:

$$x_{pl} = \frac{9.30 \times 10^{-4} \times \frac{320}{1.00}}{\frac{30}{1.5} \times 1.0} = 0.01488\text{m} = 1.49 \text{ cm}$$

$$M_{pl,Rd} = 9.30 \times 10^{-4} \times \frac{320 \times 10^3}{1.00} \cdot (10.96 \times 10^{-2} - 0.5 \times 1.49 \times 10^{-2}) = 30.4 \text{ kN.m/m}$$

Verificação:

$$20.6 \text{ kN.m/m} \leq 30.4 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Esforço transversal

Dados:

$$\gamma_c = 1.5$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{1.5} = 0.12 \text{ MPa}$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$y_G = 1.85 \text{ cm (secção transversal D, ver Tabela 5)}$$

$$d_p = h_t - y_G = 15 - 1.85 = 13.2 \text{ cm} = 132 \text{ mm}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{132}} = 2.23 \leq 2.0 \Rightarrow k = 2.0$$

$$A_{sl} = 4.84 \text{ cm}^2/\text{m (secção transversal D, ver Tabela 5)}$$

$$b_w = b_{w1} = 38.1 \text{ cm/m} = 381 \text{ mm/m (secção transversal D, ver Tabela 5)}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d_p} = \frac{4.84}{30.5 \times 13.2} = 0.0096 \leq 0.02$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$v_{\min} = 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.035 \times 2.0^{\frac{3}{2}} \times 30^{\frac{1}{2}} = 0.54 \text{ MPa}$$

Determinação do esforço transversal resistente de cálculo:

$$V_{Rd,c} = 0.12 \times 2.0 \times (100 \times 0.0096 \times 30)^{\frac{1}{3}} \times 381 \times 132 \geq 0.54 \times 381 \times 132$$

$$V_{Rd,c} = 36998 \geq 27158$$

$$V_{Rd,c} = 36998 \text{ N/m} = 37.0 \text{ kN/m}$$

Verificação:

$$20.6 \text{ kN/m} \leq 37.0 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Esforço de corte longitudinal

Dados:

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$y_G = 3.87 \text{ cm (secção transversal E, ver Tabela 6)}$$

$$d_p = h_t - y_G = 15 - 3.87 = 11.13 \text{ cm} = 111.3 \text{ mm}$$

$$\gamma_{VS} = 1.25$$

$$A_p = 13.00 \text{ cm}^2/\text{m} = 1300 \text{ mm}^2/\text{m (secção transversal E, ver Tabela 6)}$$

$$m = 154.30 \text{ N/mm}^2 \text{ (ver Tabela 9)}$$

$$k = 0.0374 \text{ N/mm}^2 \text{ (ver Tabela 9)}$$

$$L_S = L' / 4 = 4.00 / 4 = 1.00 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

Determinação do esforço de corte longitudinal resistente de cálculo:

$$V_{l,Rd} = \frac{1000 \times 111.3}{1.25} \times \left(\frac{154.30 \times 1300}{1000 \times 1000} + 0.0374 \right) = 21191 \text{ N/m} = 21.2 \text{ kN/m}$$

Verificação:

$$20.6 \text{ kN/m} \leq 21.2 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.1.1.3 Desenho para obra

Na Fig. 25 apresenta-se um corte longitudinal da solução final adoptada para a laje mista.

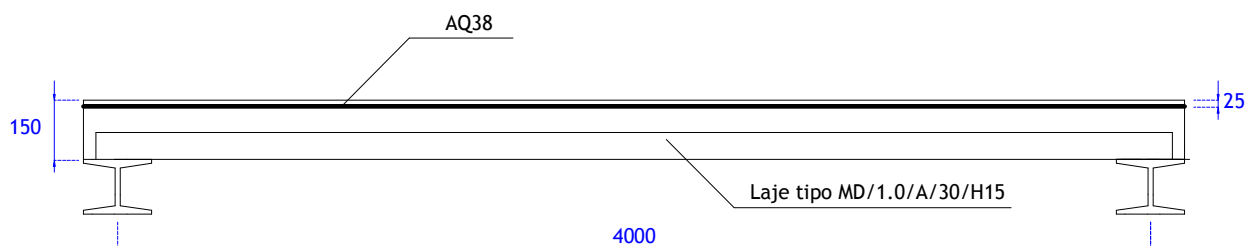


Fig. 25 - Corte longitudinal da laje mista simplesmente apoiada [distâncias em mm].

7.1.2 Fase de cofragem: verificação da chapa perfilada (MD/1.0/A/30/H15)

7.1.2.1 Estado Limite de Serviço

De acordo com o Capítulo 9.6 do EC4 - Parte 1.1 é necessário controlar a flecha δ_s da chapa perfilada na fase de cofragem. As acções a considerar são o peso próprio da chapa perfilada e do betão fresco.

A combinação de acções a usar é:

$$p_{Ed} = G_k' = 3.0 \text{ kN/m}^2$$

onde:

p_{Ed} é a carga em serviço para verificação da flecha (ver Fig. 26, com uma linha de escoramento)

$G_k' = 1.04 \times G_{pp} = 1.04 \times 2.9 = 3.0 \text{ kN/m}^2$ é o peso próprio da chapa perfilada e do betão armado fresco

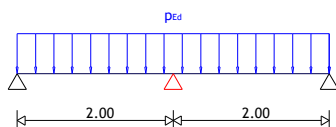


Fig. 26 - Carregamento para a verificação da flecha em fase de cofragem [distâncias em m].

A flecha (δ_s) é calculada com uma expressão do tipo:

$$\delta_s = a \cdot \frac{p_{Ed} \cdot L^4}{E_a \cdot I_p} = 0.0092 \times \frac{3.0 \times 2.0^4}{210 \times 10^6 \times 66 \times 10^{-8}} = 3.186 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.2 \text{ mm}$$

onde:

a é um coeficiente dependente do esquema estrutural ($a = 0.0092$ neste caso)

$L = 4.0 / 2 = 2.0 \text{ m}$ é vão teórico entre apoios (para este fim os escoramentos são considerados apoios)

$E_a = 210 \text{ GPa}$ é o módulo de elasticidade do aço da chapa

$I_p = \frac{I_p^A + I_p^B}{2} = \frac{56.6 + 75.6}{2} = 66 \text{ cm}^4/\text{m}$ é o valor médio do momento de inércia das secções transversais A e B da chapa perfilada (ver Tabela 2 e Tabela 3)

O valor máximo recomendado para a flecha é:

$$\delta_{s,\max} = L/180 = 2.0/180 = 0.0111 \text{ m} = 11.1 \text{ mm}$$

Verificação final:

$$3.2 \text{ mm} \leq 11.1 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.1.2.2 Estados Limites Últimos

Os estados limites últimos em fase de cofragem são abordados no Capítulo 9.5 do EC4 - Parte 1.1, que indica que o projectista deve utilizar o EC3 - Parte 1.3 para realizar as correspondentes verificações de segurança (detalhadas no respectivo Capítulo 6). As acções a considerar estão definidas no Subcapítulo 9.3.2 do EC4 - Parte 1.1, isto é:

- Peso próprio do betão fresco e da chapa perfilada (G_k');
- Cargas de construção de acordo com o EC1 - Parte 1.6, Subcapítulo 4.11.2:
 - $Q_{ca} = 1.0 \text{ kN/m}^2$ referente a pessoal e ferramentas;
 - $Q_{cc} = 0 \text{ kN/m}^2$ referente a equipamento não permanente;
 - $Q_{cf} = 0.75 \text{ kN/m}^2$ referente a cargas em estruturas em estados temporários.
- Cargas de armazenamento (0 kN/m^2 , no presente caso);
- Cargas devido ao efeito de “ponding” (amontoamento), quando necessário.

Como $\delta_5 = 3.2 \text{ mm} \ll \frac{h}{10} = \frac{150}{10} = 15 \text{ mm}$, o efeito de “ponding” pode ser ignorado (de acordo com o Subcapítulo 9.3.2 do EC4 - Parte 1.1).

A combinação de acções a utilizar é:

$$p_{Ed} = \gamma_G \cdot G_k' + \gamma_Q \cdot Q_k = 1.35 \times 3.0 + 1.5 \times 1.75 = 6.68 \text{ kN/m}^2$$

sendo:

p_{Ed} a carga de cálculo para verificações de estados limites últimos em fase de cofragem

$\gamma_G = 1.35$ o factor de segurança parcial relativo às acções permanentes

$\gamma_Q = 1.50$ o factor de segurança parcial relativo às acções variáveis

$G_k' = 3.0 \text{ kN/m}^2$ o peso próprio da chapa perfilada e do betão armado fresco

$Q_k = Q_{ca} + Q_{cf} = 1.0 + 0.75 = 1.75 \text{ kN/m}^2$

Para obtenção dos máximos esforços actuantes de cálculo em fase de cofragem (momentos flectores e esforços transversos) realizaram-se as seguintes combinações numa faixa de 1m de largura de laje:

- Combinação 1 (Fig. 27 e Fig. 28):

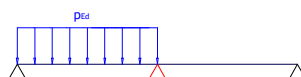


Fig. 27 - Combinação 1.

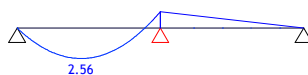


Fig. 28 - Momentos flectores de cálculo para a Combinação 1 [kN.m/m].

- Combinação 2 (Fig. 29 a Fig. 31):

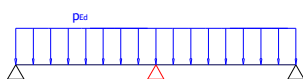


Fig. 29 - Combinação 2.



Fig. 30 - Momentos flectores de cálculo para a Combinação 2 [kN.m/m].

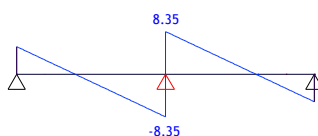


Fig. 31 - Esforço transverso de cálculo para a Combinação 2 [kN/m].

Os máximos esforços actuantes de cálculo são: $M_{Ed}^+ = 2.56 \text{ kN.m/m}$, $M_{Ed}^- = -3.34 \text{ kN.m/m}$ e $V_{Ed} = 8.35 \text{ kN/m}$.

Momento flector positivo

Para a determinação do módulo de flexão eficaz (W_{eff}) é necessário retirar as zonas da chapa perfilada susceptíveis de instabilização (a chapa perfilada é uma secção da Classe 4). Este aspecto, referido no Subcapítulo 5.5.2 do EC3 - Parte 1.3, reencaminha o projectista para o Capítulo 4.4 do EC3 - Parte 1.5. A secção transversal A representada na Fig. 2 corresponde já à secção final eficaz da chapa perfilada, sem a contribuição das zonas susceptíveis de instabilização quando a secção é sujeita a momentos flectores positivos.

No Subcapítulo 6.1.4.1 do EC3 - Parte 1.3 é apresentada a seguinte fórmula para determinação do momento flector resistente de cálculo da referida secção na fase de cofragem:

$$M_{c,Rd}^+ = \frac{W_p \cdot f_{yp}}{\gamma_{m0}} \Leftrightarrow M_{c,Rd}^+ = \frac{16.9 \times 10^{-6} \times 320 \times 10^3}{1.00} = 5.41 \text{ kN.m/m}$$

sendo:

$W_p = 16.9 \text{ cm}^3/\text{m}$ o módulo eficaz de flexão da secção da chapa perfilada (secção transversal A, ver Tabela 1)

$f_{yp} = 320 \text{ MPa}$ a resistência à tracção da chapa

$\gamma_{m0} = 1.00$ o coeficiente parcial de segurança relativo ao aço da chapa

Verificação:

$2.56 \text{ kN.m/m} < 5.41 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$

Momento flector negativo

Para determinação do momento flector negativo resistente de cálculo a verificação processa-se de forma idêntica à anterior, mas considerando para a chapa perfilada MUNDIDECK a secção transversal B (ver Fig. 3). Neste caso tem-se $W_p = 18.3 \text{ cm}^3/\text{m}$ (ver Tabela 3)

O momento flector resistente negativo vale então:

$$M_{c,Rd}^- = \frac{18.3 \times 10^{-6} \times 320 \times 10^3}{1.00} = 5.86 \text{ kN.m/m}$$

Verificação:

$$3.34 \text{ kN.m/m} < 5.86 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Esforço transverso

No Subcapítulo 6.1.5 do EC3 - Parte 1.3 é apresentada a seguinte fórmula de cálculo do esforço transverso resistente por alma da chapa perfilada em fase de cofragem:

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \emptyset} \cdot t \cdot f_{bv}}{Y_{m0}} = \frac{\frac{2.50 \times 10^{-2}}{\sin 62.2^\circ} \times 0.96 \times 10^{-3} \times 186 \times 10^3}{1.00} = 5.05 \text{ kN/alma}$$

Atendendo à existência de 8.88 almas de chapa perfilada em cada metro de largura de laje mista:

$$V_{b,Rd} = 8.88 \times 5.05 = 44.8 \text{ kN/m}$$

sendo:

$h_w = 2.50 \text{ cm}$ a altura do perfil descontando a zona das bossas

$\emptyset = 62.2^\circ$ o ângulo entre a alma e o banzo (ver Fig. 1)

$t = 0.96 \text{ mm}$ a espessura da chapa, retirando a espessura de zincagem

$f_{bv} = 0.58 \times f_{yb} = 0.58 \times 320 = 186 \text{ MPa}$ a resistência ao corte da chapa considerando instabilização da chapa perfilada. O valor de f_{bv} está definido na Tabela 6.1 do EC3 - Parte 1.3

Verificação:

$$8.35 \text{ kN/m} < 44.8 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Forças transversais locais

No Subcapítulo 6.1.7.3 do EC3 - Parte 1.3 é apresentada a seguinte fórmula de cálculo da força transversal resistente de cálculo por alma da chapa perfilada em fase de cofragem:

$$R_{w,Rd} = \frac{\alpha \cdot t^2 \cdot \sqrt{f_{yb}} \cdot E \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \cdot \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{l_a}{t}}\right) \cdot \left[2.4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right]}{\gamma_{m1}}$$
$$R_{w,Rd} = \frac{0.15 \times (0.96)^2 \times \sqrt{320 \times 210 \times 10^3} \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \sqrt{\frac{5}{0.96}}\right) \cdot \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{10}{0.96}}\right) \cdot \left[2.4 + \left(\frac{62.2}{90}\right)^2\right]}{1.00}$$

$$R_{w,Rd} = 2407 \text{ N/alma}$$

Atendendo à existência de 8.88 almas de chapa perfilada em cada metro de largura de laje mista:

$$R_{w,Rd} = \frac{8.88}{1000} \times 2407 = 21.4 \text{ kN/m}$$

sendo:

$t = 0.96$ mm a espessura da chapa, retirando a espessura de zincagem [mm]

$f_{yb} = 320$ MPa a resistência à tracção do aço da chapa [MPa]

$E = 210$ GPa o módulo de elasticidade do aço da chapa [GPa]

$r = 5$ mm o raio interno de conformação da chapa perfilada nos cantos [mm]

$\varnothing = 62.2^\circ$ o ângulo de inclinação entre a alma e o banzo [°]

$\gamma_{m1} = 1.00$ o coeficiente parcial de segurança relativo ao aço da chapa

Os parâmetros $\alpha = 0.15$ e $l_a = 10$ mm dependem da profundidade de chapa perfilada que realmente apoia no suporte (viga ou outro). Neste caso, admitiu-se categoria 2 (Subcapítulo 6.1.7.3 do EC3 - Parte 1.3)

Verificação:

$$8.35 \text{ kN/m} < 21.4 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Combinação do esforço transversal com o momento flector

No caso de $V_{Ed} \geq 0.50 V_{b,Rd}$ é necessário verificar a interacção do momento flector de cálculo com o esforço transversal de cálculo. No Subcapítulo 6.1.10 do EC3 - Parte 1.3 é apresentada a seguinte fórmula de interacção, que é importante sobre os apoios contínuos:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{b,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1.0$$

sendo:

M_{Ed} o momento flector actuante de cálculo

$M_{c,Rd}^-$ o momento flector negativo resistente calculado em 7.1.2.2

$M_{f,Rd}$ o momento resistente plástico da secção considerando apenas a contribuição dos banzos: ($M_{f,Rd} \approx 60\% M_{c,Rd}^-$ para $e = 0.8$ mm e $M_{f,Rd} \approx 70\% M_{c,Rd}^-$ para $e = 1.0$ mm)

$M_{pl,Rd}$ o momento resistente plástico da secção considerada em 7.1.2.2

V_{Ed} o esforço transversal actuante de cálculo

$V_{b,Rd}$ o esforço transversal resistente calculado de acordo com 7.1.2.2

Como $V_{Ed} \leq 0.5 V_{b,Rd}$ (8.35 kN/m ≤ 22.4 kN/m, no presente caso) não é necessário considerar esta interacção no presente exemplo.

Combinação da força transversal local com o momento flector

No Subcapítulo 6.1.11 do EC3 - Parte 1.3 é apresentada a seguinte fórmula de interacção da força transversal local de cálculo com o momento flector de cálculo, que é importante sobre os apoios contínuos:

$$\frac{M_{Ed}^-}{M_{c,Rd}^-} + \frac{V_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1.25$$

$$\frac{3.34}{5.86} + \frac{8.35}{21.4} \leq 1.25$$

$$0.96 \leq 1.25 \therefore \text{OK (verifica)}$$

sendo:

$M_{Ed}^- = 3.34$ kN.m/m o momento flector actuante de cálculo

$M_{c,Rd}^- = 5.86$ kN.m/m o momento flector resistente de cálculo

$V_{Ed} = 8.35$ kN/m a força transversal local actuante de cálculo

$R_{w,Rd} = 21.4$ kN/m a força transversal resistente de cálculo

7.2 Exemplo 2: Laje mista contínua

Neste exemplo é aplicada à laje mista contínua uma sobrecarga “aparente” total com o valor: $1.0 \times 1.35 / 1.5 + 5.0 = 5.9 \text{ kN/m}^2$. De acordo com as tabelas de dimensionamento da Secção 4.2, poderiam ser utilizadas em alternativa: i) uma laje de 16 cm de espessura total com chapa perfilada de espessura $e = 0.8 \text{ mm}$ e duas linhas de escoramento, tipo MD/0.8/C/30/H16 (ver Tabela 14), ou ii) uma laje de 15 cm de espessura total com chapa perfilada de espessura $e = 1.0 \text{ mm}$ e uma linha de escoramento, tipo MD/1.0/C/30/H15 (ver Tabela 17).

Dado tratar-se de um caso corrente é possível com os valores indicados nas tabelas considerar a estrutura dimensionada. A título ilustrativo procede-se em seguida às verificações a realizar para o caso da laje tipo MD/1.0/C/30/H15, e que permitem justificar as conclusões que acabam de ser obtidas apenas com as tabelas. De acordo com a Tabela 19 seria necessária uma armadura ordinária de continuidade igual a $4.1 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Uma vez que a geometria da secção transversal desta laje mista é idêntica à do Exemplo 1, alguns cálculos serão omitidos, apresentando-se apenas os resultados finais de algumas das verificações.

7.2.1 Fase mista: dimensionamento da laje (MD/1.0/C/30/H15)

7.2.1.1 Estados Limites de Serviço

Fendilhação do betão

De acordo com a Secção 3.1.1.1 será determinada a armadura mínima a colocar sobre os apoios intermédios sem cálculo directo. No Subcapítulo 7.3.2 do EC2 - Parte 1.1 encontra-se a seguinte expressão:

$$A_{S,\min} \cdot \sigma_s = K_c \cdot K \cdot f_{ct,\text{eff}} \cdot A_{ct}$$

onde:

$A_{S,\min}$ é a área mínima de armadura que garante uma abertura de fendas pretendida

σ_s é a tensão máxima instalada na armadura ordinária colocada sobre os apoios intermédios, após a fendilhação do betão

K_c é um coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção

K é um coeficiente que considera o efeito de tensões não uniformes auto-equilibradas

A_{ct} é a área da secção de betão traccionada (área da lajeta, ver Tabela 8)

Dados:

$\sigma_s = 360 \text{ MPa}$ ($w_k = 0.4 \text{ mm}$ e $\varnothing = 10 \text{ mm}$, Tabela 7.2N do EC2)

$K_c = 0.5$

$K = 1.0$

$f_{ct,\text{eff}} = 2.9 \text{ MPa}$

$A_{ct} = 860 \text{ cm}^2/\text{m}$

Cálculo:

$$A_{S,\min} \times 360 = 0.5 \times 1.0 \times 2.9 \times 860$$

$$A_{S,\min} = 3.46 \text{ cm}^2/\text{m}$$

O valor calculado é inferior ao obtido pela consulta da Tabela 19, conforme seria de esperar.

A armadura de distribuição pode ser consultada na Tabela 18: $A_{S,\text{dist}} = 0.9 \text{ cm}^2/\text{m}$

Flecha

De acordo com a Secção 3.1.1.2 a flecha poderá ser verificada através da comparação da razão l/d com um valor limite, adequadamente corrigido em função da tensão na armadura na combinação característica. No Subcapítulo 7.4.2 do EC2 - Parte 1.1 encontra-se $(l/d)_0 \leq 26$.

Dados:

$$l = 4.0 \text{ m} = 400 \text{ cm}$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$y_G = 3.04 \text{ cm (altura do centro de gravidade da secção transversal A, ver Tabela 2)}$$

$$d = h_t - y_G = 15 - 3.04 = 11.96 \text{ cm}$$

$$x_C = 4.21 \text{ cm (profundidade do eixo neutro da secção mista fissurada, ver Tabela 11)}$$

$$I_{cc} = 679 \text{ cm}^4/\text{m (inércia da secção mista fissurada, ver Tabela 11)}$$

Cálculos (combinação característica):

$$\left(\frac{l}{d}\right) = \frac{400}{11.96} = 33.4$$

$$p = G_k + Q_k = (2.9 + 1.0) + 5.0 = 8.9 \text{ kN/m}^2 \text{ (ver Tabela 7)}$$

$$M^+ = 0.096 \cdot p \cdot l^2 = 0.096 \times 8.9 \times 4.0^2 = 13.7 \text{ kN.m/m}$$

$$\sigma_s = \frac{M^+}{I_{cc}} \cdot (d - x_C) = \frac{13.7}{679 \times 10^{-8}} \times \frac{(11.96 - 4.21)}{100} = 156370 \text{ KPa} = 156 \text{ MPa}$$

$$k_{\sigma_s} = \frac{310}{\sigma_s} = \frac{310}{156} = 2.0$$

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{\text{lim}} = \left(\frac{l}{d}\right)_0 \cdot k_{\sigma_s} = 26 \times 2.0 = 52.0$$

Verificação:

$$33.4 \leq 52.0 \quad \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.2.1.2 Estados Limites Últimos

De acordo com a Secção 3.1.2 as cargas a utilizar são:

$$G_k = 2.9 + 1.0 = 3.9 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_k = 5.0 \text{ kN/m}^2$$

A carga total actuante de cálculo vem:

$$p_{Ed} = 1.35 \times 3.9 + 1.5 \times 5.0 = 12.8 \text{ kN/m}^2$$

Para obtenção dos esforços máximos actuantes de cálculo realizaram-se as seguintes combinações, por faixa de 1m de largura de laje:

- Momentos flectores negativos máximos de cálculo (Fig. 32 e Fig. 33):

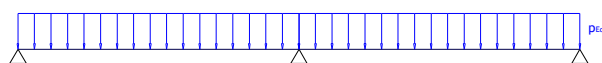


Fig. 32 - Combinação 1.



Fig. 33 - Momentos flectores actuantes de cálculo para a Combinação 1 [kN.m/m].

- Momentos flectores positivos e esforços transversos máximos de cálculo (Fig. 34 a Fig. 36):

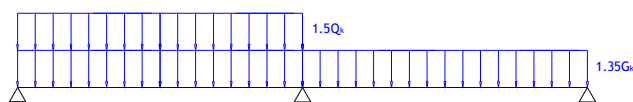


Fig. 34 - Combinação 2.

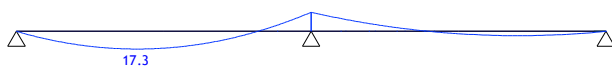


Fig. 35 - Momentos flectores actuantes de cálculo para a Combinação 2 [kN.m/m].

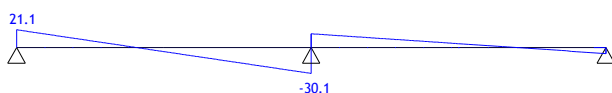


Fig. 36 - Esforços transversos actuantes de cálculo para a Combinação 2 [kN/m].

O momento negativo no apoio intermédio será reduzido de 30% (redistribuição), limitando-o a 17.9 kN.m/m (Fig. 37). O diagrama de V_{Ed} após redistribuição encontra-se reproduzido na Fig. 38.

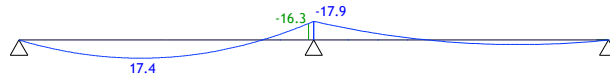


Fig. 37 - Momentos flectores actuantes de cálculo após redistribuição [kN.m/m].

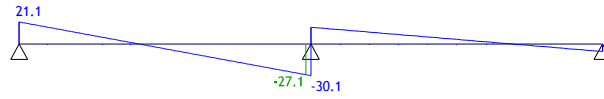


Fig. 38 - Esforços transversos actuantes de cálculo após redistribuição [kN/m].

É prática corrente no dimensionamento de elementos de betão armado os momentos flectores negativos actuantes sobre os apoios contínuos serem determinados à face do apoio. Neste caso considerou-se um apoio de 10 cm de largura, pelo que os momentos flectores negativos foram avaliados a 5 cm do eixo do apoio.

É igualmente habitual o esforço transversal actuante de cálculo ser avaliado a uma distância da face do apoio igual à altura útil da laje. Neste caso considerou-se que o somatório da altura útil da laje com a distância da face do apoio ao eixo deste era de 20 cm. Esta simplificação apenas foi considerada no apoio central.

Assim, os esforços máximos actuantes de cálculo obtidos têm os seguintes valores (ver Fig. 37 e Fig. 38):

$$M_{Ed}^- = -16.3 \text{ kN.m/m e } M_{Ed}^+ = 17.4 \text{ kN.m/m}$$

$$V_{Ed}^{int} = 27.1 \text{ kN/m e } V_{Ed}^{ext} = 21.1 \text{ kN/m}$$

Momento flector positivo

Idêntico ao Exemplo 1:

$$M_{pl,Rd} = 30.4 \text{ kN.m/m}$$

Verificação:

$$17.4 \text{ kN.m/m} \leq 30.4 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Momento flector negativo

Dados:

$$f_{sk} = 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1.15$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$\gamma_c = 1.5$$

$$b_c = 23.6 \text{ cm/m}$$

$$c = 3 \text{ cm } (\approx 25 \text{ mm de recobrimento})$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$d_s = h_t - c = 15 - 3 = 12.0 \text{ cm}$$

Cálculo da armadura de continuidade para resistência ao momento flector actuante negativo de cálculo:

$$x_{pl} = \frac{A_s \times \frac{500}{1.15}}{\frac{30}{1.5} \times 23.6 \times 10^{-2}} = 92.1 A_s$$

$$M_{Ed}^- \leq M_{pl,Rd}$$

$$16.3 \leq A_s \times \frac{500 \times 10^3}{1.15} \cdot (12.0 \times 10^{-2} - 0.5 \times 92.1 \times A_s)$$

$$A_s \geq 3.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m} = 3.62 \text{ cm}^2/\text{m}$$

O valor calculado é inferior ao obtido pela consulta da Tabela 19, conforme seria de esperar.

Esforço transversal

Dados:

$$\gamma_c = 1.5$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{1.5} = 0.12 \text{ MPa}$$

$$h_t = 15 \text{ cm}$$

$$c = 3.0 \text{ cm (recobrimento da armadura de continuidade)}$$

$$d_p = h_t - c = 15 - 3.0 = 12.0 \text{ cm} = 120 \text{ mm (relativo à armadura superior de continuidade)}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{120}} = 2.29 \leq 2.0 \Rightarrow k = 2.0$$

$$A_{st} = 3.62 \text{ cm}^2/\text{m (armadura ordinária longitudinal na zona traccionada)}$$

$$b_w = b_{w2} = 46.5 \text{ cm/m} = 305 \text{ mm/m (secção transversal D, ver Tabela 5)}$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w \cdot d_p} = \frac{3.62}{46.5 \times 12.0} = 0.0065 \leq 0.02$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$V_{min} = 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} = 0.035 \times 2.0^{\frac{3}{2}} \times 30^{\frac{1}{2}} = 0.54 \text{ MPa}$$

Determinação do esforço transversal resistente de cálculo junto ao apoio central:

$$V_{Rd,c} = 0.12 \times 2.0 \times (100 \times 0.0065 \times 30)^{\frac{1}{3}} \times 465 \times 120 \geq 0.54 \times 465 \times 120$$

$$V_{Rd,c} = 36046 \geq 30132$$

$$V_{Rd,c} = 36046 \text{ N/m} = 36.0 \text{ kN/m}$$

Verificação:

$$27.1 \text{ kN/m} \leq 36.0 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Determinação do esforço transversal resistente de cálculo junto ao apoio lateral:

$$V_{Rd,c} = 37.0 \text{ kN/m (Idêntico ao Exemplo 1)}$$

Verificação:

$$21.1 \text{ kN/m} \leq 37.0 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Esforço de corte longitudinal

Dados:

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$y_G = 3.87 \text{ cm (secção transversal E, ver Tabela 6)}$$

$$d_p = h_t - y_G = 15 - 3.87 = 11.13 \text{ cm} = 111.3 \text{ mm}$$

$$\gamma_{VS} = 1.25$$

$$A_p = 13.00 \text{ cm}^2/\text{m} = 1300 \text{ mm}^2/\text{m (secção transversal E, ver Tabela 6)}$$

$$m = 154.30 \text{ N/mm}^2 \text{ (ver Tabela 9)}$$

$$k = 0.0374 \text{ N/mm}^2 \text{ (ver Tabela 9)}$$

$$L' = 0.9 \times L = 0.9 \times 4.0 = 3.6 \text{ m}$$

$$L_s = L' / 4 = 3.6 / 4 = 0.90 \text{ m} = 900 \text{ mm}$$

Cálculo do esforço de corte longitudinal resistente de cálculo:

$$V_{l,Rd} = \frac{1000 \times 111.3}{1.25} \times \left(\frac{154.30 \times 1300}{1000 \times 900} + 0.0374 \right) = 23175 \text{ N/m} = 23.2 \text{ kN/m}$$

No caso de uma laje contínua sem interrupções nem sobreposições de chapa perfilada nos apoios, apenas existe corte longitudinal nos apoios extremos, pelo que o esforço transversal actuante de cálculo a considerar é o relativo aos apoios extremos.

Verificação:

$$21.1 \text{ kN/m} \leq 23.2 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.2.1.3 Desenho para obra

Na Fig. 39 apresenta-se um corte longitudinal da solução adoptada para a laje mista.

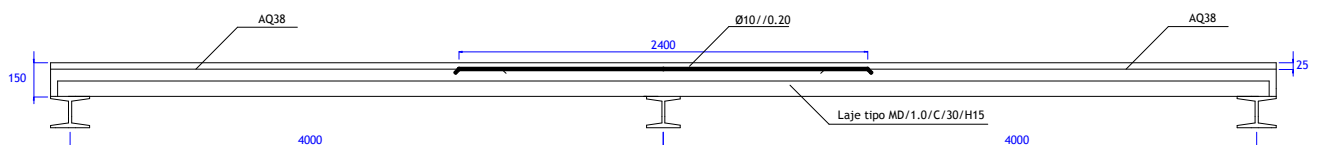


Fig. 39 - Corte longitudinal da laje mista contínua [distâncias em mm].

7.2.2 Fase de cofragem: verificação da chapa perfilada (MD/1.0/C/30/H15)

7.2.2.1 Estado Limite de Serviço

O valor de p_{Ed} é idêntico ao do Exemplo 1: $p_{Ed} = 3.0 \text{ kN/m}^2$ (ver Fig. 40, com uma linha de escoramento por vão).

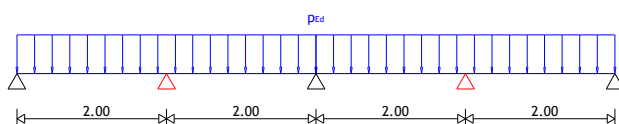


Fig. 40 - Carregamento para a verificação da flecha em fase de cofragem [distâncias em m].

A flecha δ_s é calculada com uma expressão do tipo:

$$\delta_s = a \cdot \frac{p_{Ed} \cdot L^4}{E_a \cdot I_p} = 0.0065 \times \frac{3.0 \times 2.0^4}{210 \times 10^6 \times 66 \times 10^{-8}} = 2.251 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.3 \text{ mm}$$

onde:

a é um coeficiente dependente do esquema estrutural ($a = 0.0065$ neste caso)

$L = 4.0 / 2 = 2.0 \text{ m}$ é vão teórico entre apoios (para este fim os escoramentos são considerados apoios)

$E_a = 210 \text{ GPa}$ é o módulo de elasticidade do aço da chapa

$I_p = \frac{I_p^A + I_p^B}{2} = \frac{56.6 + 75.6}{2} = 66 \text{ cm}^4/\text{m}$ é o valor médio do momento de inércia das secções transversais A e B da chapa perfilada (ver Tabela 2 e Tabela 3)

O valor máximo recomendado para a flecha é:

$$\delta_{s,\max} = L/180 = 2.0/180 = 0.0111 \text{ m} = 11.1 \text{ mm}$$

Verificação final:

$$2.3 \text{ mm} \leq 11.1 \text{ mm} \quad \therefore \text{OK (verifica)}$$

7.2.2.2 Estados Limites Últimos

O valor da acção de cálculo é igual ao do Exemplo 1. Assim: $p_{Ed} = 6.68 \text{ kN/m}^2$.

Para obtenção dos máximos esforços actuantes de cálculo em fase de cofragem (momentos flectores e esforços transversos) realizaram-se as seguintes combinações numa faixa de 1m de largura de laje:

- Combinação 1: Momento flector positivo máximo de cálculo (Fig. 41 e Fig. 42):

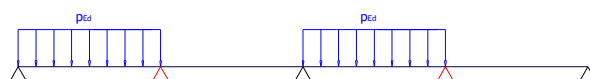


Fig. 41 - Combinação 1.

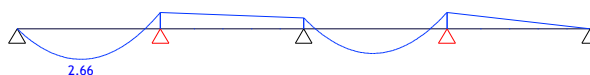


Fig. 42 - Momentos flectores de cálculo para a Combinação 1 [kN.m/m].

- Combinação 2: Momento flector negativo máximo de cálculo (Fig. 43 e Fig. 44):



Fig. 43 - Combinação 2.

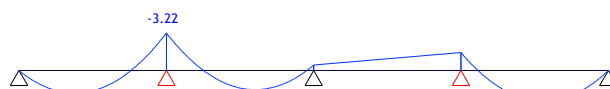


Fig. 44 - Momentos flectores de cálculo para a Combinação 2 [kN.m/m].

- Combinação 3: Esforço transversal máximo de cálculo (Fig. 45 e Fig. 46):

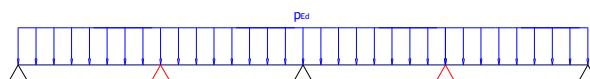


Fig. 45 - Combinação 3.

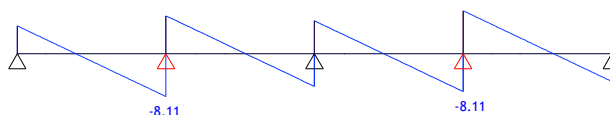


Fig. 46 - Esforço transversal de cálculo para a Combinação 3 [kN/m].

Os máximos esforços actuantes de cálculo são então: $M_{Ed}^+ = 2.66 \text{ kN.m/m}$, $M_{Ed}^- = -3.22 \text{ kN.m/m}$ e $V_{Ed} = 8.11 \text{ kN/m}$.

Momento flector positivo

Idêntico ao Exemplo 1:

$$M_{c,Rd}^+ = 5.41 \text{ kN.m/m}$$

Verificação:

$$2.66 \text{ kN.m/m} < 5.41 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Momento flector negativo

Idêntico ao Exemplo 1:

$$M_{c,Rd}^- = 5.86 \text{ kN.m/m}$$

Verificação:

$$3.22 \text{ kN.m/m} < 5.86 \text{ kN.m/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Esforço transversal

Idêntico ao Exemplo 1:

$$V_{b,Rd} = 44.8 \text{ kN/m}$$

Verificação:

$$8.11 \text{ kN/m} < 44.8 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Forças transversais locais

Idêntico ao Exemplo 1:

$$R_{w,Rd} = 21.4 \text{ kN/m}$$

Verificação:

$$8.11 \text{ kN/m} < 21.4 \text{ kN/m} \therefore \text{OK (verifica)}$$

Combinação do esforço transversal com o momento flector

Como $V_{Ed} \leq 0.5 V_{w,Rd}$ ($8.11 \text{ kN/m} \leq 22.4 \text{ kN/m}$) não é necessário considerar esta interacção no presente exemplo.

Combinação da força transversal local com o momento flector

Verificação:

$$\frac{M_{Ed}^-}{M_{c,Rd}^-} + \frac{V_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1.25$$

$$\frac{3.22}{5.86} + \frac{8.11}{21.4} \leq 1.25$$

$$0.93 \leq 1.25 \therefore \text{OK (verifica)}$$

NOTA: rigorosamente esta verificação devia ser realizada com valores de V_{Ed} e M_{Ed}^- relativos à mesma combinação de acções. Contudo a simplificação utilizada está do lado da segurança.

8 BIBLIOGRAFIA

- EUROCODE 0: Basis of structural design, Abril 2002.
- EUROCODE 1: Actions on structures. Part 1.6: General actions - Actions during execution, Março 2003.
- EUROCODE 2: Design of concrete structures. Part 1.1: General rules and rules buildings, Abril 2004.
- EUROCODE 3: Design of steel structures. Part 1.1: General Rules and rules for buildings, Maio 2005.
- EUROCODE 3: Design of steel structures. Part 1.3: General Rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Julho 2004.
- EUROCODE 3: Design of steel structures. Part 1.5: Plated structural elements, Dezembro 2004.
- EUROCODE 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, Dezembro 2004.
- EUROCODE 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.2: General Rules - Sctructural Fire Design, Maio 2003.
- Rui Faria - Pavimentos Mistos Aço-Betão, Análise e Dimensionamento - *Curso de Formação e Especialização em Projecto de Estruturas de Betão* - Porto, 1997.
- Ph. Beguin et L. Sokol - 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.
- Ph. Beguin, M. Crisinel et L. Sokol - 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.
- R. P. Johnson and D. Anderson - Designer's Handbook to Eurocode 4. Part 1.1: Design of Composite Steel and Concrete Structures - *Thomas Telford Services Ltd* - London, 1993.
- Figueiras, Joaquim; Faria, Rui; Santos, José; Silva, Paula - Análise do comportamento e dimensionamento de lajes mistas com chapas perfiladas MUNDIDECK: Relatório dos Ensaios para determinação da resistência ao corte longitudinal - LABEST - Porto, FEUP, 2010.

Porto e FEUP, 1 de Outubro de 2010

Os autores:

José Manuel Martins Neto dos Santos
(Mestre em Estruturas)

Rui Manuel Carvalho Marques de Faria
(Professor Associado com Agregação)

Joaquim de Azevedo Figueiras
(Professor Catedrático)
(Director do LABEST)