



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

Lajes aligeiradas mistas aço-betão BEAL. Sistema construtivo e metodologia de dimensionamento

Mariana do Couto Pereira

Leiria, setembro de 2019



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Lajes aligeiradas mistas aço-betão BEAL. Sistema
construtivo e metodologia de dimensionamento***

Mariana do Couto Pereira

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Veludo Vieira Pereira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Pedro Miguel Duarte dos Santos.

Leiria, setembro de 2019

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Ao meu menino

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

A concretização desta dissertação de mestrado contou com apoios de várias pessoas e empresas, sem os quais não se teria tornado uma realidade, pelo que lhes estarei eternamente grata.

Ao professor Doutor João Veludo, no papel de orientador, pela sua orientação fundamental ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pela sua disponibilidade e apoio prestado.

Ao Doutor Pedro Santos, no papel de coorientador, pelo seu contributo e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Doutor Hugo Costa, docente do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo seu apoio na formulação do betão de agregados leves a utilizar durante a realização deste trabalho.

Ao meu esposo e amigo, Eng.º Igor Alves, pelo seu apoio incondicional desde o início e pela motivação para seguir aquilo em que acredito.

Aos meus pais, por todo o apoio prestado ao longo dos últimos anos, que possibilitou a obtenção de um curso superior bem como a persistência na finalização desta dissertação.

Ao meu amigo João Baptista, o meu profundo agradecimento pelo apoio incondicional que demonstrou durante todas as fases da dissertação. Com a sua dedicação e paciência, ajudou-me na superação dos obstáculos que foram surgindo ao longo desta caminhada.

À empresa Secil pelo fornecimento de todo o cimento utilizado durante a campanha experimental.

À empresa Weber pelo fornecimento da argila expandida utilizada na composição de betão leve.

À empresa BASF pelo fornecimento do superplastificante.

À empresa Blocotelha, na pessoa do Eng.º Samuel Pereira, pelo fornecimento das chapas de aço colaborante.

À Empresa JFPereira pelo fornecimento e execução de cofragens em madeira, e transporte de materiais.

Ao Marco e ao Hélio, amigos de longa data, pelo seu contributo e empenho na campanha de betonagem das lajes em laboratório.

A todos os meus familiares e amigos, que apesar de não estarem mencionados individualmente, tiveram um contributo positivo direta ou indiretamente no decorrer deste trabalho.

Resumo

As lajes mistas aço-betão são uma solução com uma vasta aplicação em vários tipos de soluções estruturais, quer sejam elas novas, de reabilitação ou de reforço. Por norma o comportamento destas lajes depende do seu vão, ditando assim o seu modo de rotura predominante. Para vãos pequenos (curtos) o corte vertical é condicionante, para vãos grandes (longos) a sua capacidade resistente á flexão, enquanto que para vãos intermédios o corte longitudinal condiciona o dimensionamento.

Este trabalho foca-se no comportamento de lajes mistas com vãos intermédios e no corte longitudinal, e o dimensionamento deste tipo de solução segundo o Eurocódigo 4. Para avaliar o comportamento das lajes mistas foi realizado um trabalho experimental com ensaios de flexão de 4 pontos em 8 lajes mistas aço-BEAL de diferentes espessuras ($h_t = 0,13$ m e $h_t = 0,15$ m) para avaliação do seu comportamento. O betão utilizado foi um betão leve com o objetivo de diminuir o peso próprio das lajes.

Os resultados obtidos mostram um comportamento dúctil do conjunto devido aos mecanismos de transferência de carga na interface aço-betão. Este foi mais pronunciado nos elementos com maior espessura, chegando a apresentar um patamar com endurecimento após fendilhação. A maioria das lajes ensaiadas apresentaram comportamentos e tipos de rotura semelhantes, diferindo apenas no valor do deslocamento na rotura.

Palavras-chave: laje mista; corte longitudinal; aço-betão; betão leve

Abstract

Steel-concrete composite slabs are a solution with numerous applications in various types of structural solutions, whether new, retrofitting or reinforcement. Usually, the behavior of these slabs depends on their span, thus dictating their predominant mode of failure. For small (short) spans the vertical shear dictates the failure, for large (long) spans their flexural strength, while for intermediate spans, the longitudinal shear limits the design.

This work focuses on the behavior of intermediate spanned slabs, the longitudinal shear, and the design of this type of solution according to Eurocode 4. Experimental work with 4-point bending tests was performed to evaluate the behavior of 8 lightweight concrete composite slabs of different thicknesses ($h_t = 0,13$ m and $h_t = 0,15$ m). The concrete used was lightweight concrete in order to decrease the slab's weight.

The results show a ductile behavior of the assembly due to the load transfer mechanisms at the steel-concrete interface. This behavior was more pronounced in the thicker elements, reaching a level with hardening after cracking. Most tested slabs had a similar response and types of failure, differing only in the displacement value at failure.

Keywords: composite slab; longitudinal shear; steel-concrete; lightweight concrete

Lista de figuras

Figura 1 – Pormenor tipo de uma laje mista.....	2
Figura 2 – Primeiro modelo desenvolvido de chapa colaborante.....	5
Figura 3 – Tipos de chapa colaborante: a) trapezoidal e b) reentrante.....	6
Figura 4 – Representação gráfica do comportamento de uma laje mista	8
Figura 5 – Tipos de chapas perfiladas	12
Figura 6 – Espaçamento dos varões da armadura de distribuição.....	12
Figura 7 - Esquematização da armadura transversal mínima para cargas concentradas	13
Figura 8 – Elementos constituintes de uma laje mista	14
Figura 9 – Pormenor das armaduras de reforço longitudinais.....	14
Figura 10 – Relação entre o modo de colapso e o vão da laje.....	17
Figura 11 – Edifício comercial com laje mista.....	18
Figura 12 – Laje mista utilizada em reabilitação / mudança de utilização.....	19
Figura 13 – Relação da dimensão nominal dos agregados e a dimensão do elemento estrutural	20
Figura 14 – Comprimento mínimo nos apoios	21
Figura 15 – Disposições construtivas de lajes mistas.....	22
Figura 16 – Execução de laje mista em duas fases.....	22
Figura 17 - Sobrecargas de construção para chapas perfiladas utilizadas como cofragem. 27	
Figura 18 – Alma da chapa colaborante	32
Figura 19 – Largura efetiva de uma laje mista com chapa colaborante sujeita a uma carga concentrada.....	35
Figura 20 – Distribuição plástica de tensões, quando LN_{pl} se situa por cima da chapa colaborante.....	41
Figura 21 – Distribuição plástica simplificada de tensões, quando LN_{pl} interceta a chapa colaborante.....	43
Figura 22 – Distribuição plástica de tensões para momento fletor negativo.....	45
Figura 23 – Distribuição plástica de tensões para momento fletor negativo considerando a nervura com a largura média b_0	46
Figura 24 – Relação entre o modo de colapso e o vão da laje.....	48
Figura 25 – Definição do perímetro do contorno crítico para o punçoamento de uma laje mista	51

Figura 26 – Modelo de arco e tirante para a determinação da flecha a meio-vão de lajes mistas com amarração na extremidade.....	55
Figura 27 – Geometria dos modelos	58
Figura 28 – Geometria da chapa colaborante (em milímetros).....	59
Figura 29 – Desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo	61
Figura 30 – Fabrico dos modelos	63
Figura 31 – Esquematização da colocação dos extensómetros nas zonas da secção	64
Figura 32 – Instrumentação.....	65
Figura 33 - Layout do ensaio à flexão.....	66
Figura 34 – Ilustração da fissuração e posição relativa das fissuras da laje LC 1.4 ($h_t = 13$ cm).....	70
Figura 35 – Curvas carga / deslocamento e extensão/deslocamento (LC 1.4).....	71
Figura 36 – Ilustração da fissuração e posição relativa das fissuras da laje LC 2.4 ($h_t = 15$ cm).....	72
Figura 37 – Curvas carga / deslocamento e extensão/deslocamento (LC 2.4).....	73
Figura 38 – Resumo curvas carga-deslocamento das lajes com $h_t=13$ cm	74
Figura 39 – Resumo curvas carga-deslocamento das lajes com $h_t=15$ cm	74
Figura 40 – Modo de rotura observado nas lajes com $h_t = 13$ cm.....	76
Figura 41 – Modo de rotura observado nas lajes com $h_t = 15$ cm.....	77
Figura 42 – Curva carga / deslocamento da laje LC 1.2	78
Figura 43 – Curva carga / deslocamento da laje 2.4	78
Figura 44 – Comparação com ensaios realizados por Penza em 2010 (Penza, 2010)	80

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fases do processo construtivo	20
Tabela 2 - Sobrecargas de construção para chapas perfiladas utilizadas como cofragem ..	27
Tabela 3 – Tensão tangencial considerando a encurvadura f_{bv}	33
Tabela 4 – Valores para L_s	50
Tabela 5 - Valores de L/d_p para lajes mistas sem esforço normal de compressão	56
Tabela 6 – Características dos modelos adotados	59
Tabela 7 - Propriedades geométricas e mecânicas do perfil BC 70	60
Tabela 8 - Composição do betão leve adotado (LC 25/28)	60
Tabela 9 – Resistência à compressão do betão LC 25/28.....	61
Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos.....	68
Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos.....	69

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

Siglas e Acrónimos

EC2	Eurocódigo 2
EC3	Eurocódigo 3
EC4	Eurocódigo 4
BEAL	Betão Estrutural de Agregados Leves
BDN	Betão de Densidade Normal
BAR	Betão de Alta Resistência
LC	Lightweight concrete
AISI	American Iron and Steel Institute

Letras Gregas

δ	flecha
$\delta_{\text{máx}}$	Flecha máxima
γ_{vs}	coeficiente parcial de segurança relativo à conexão
γ_c	coeficiente parcial relativo ao betão
γ_p	coeficiente parcial relativo às ações associadas com pré-esforço, P
γ_M	coeficiente parcial relativo às propriedades dos materiais, tendo em conta as incertezas na propriedade do material, nas imperfeições geométricas e no modelo de cálculo utilizado
δ_s	deformação da chapa de aço sob a ação do peso próprio e do betão fresco
λ_w	esbelteza da alma
ϵ_t	extensão de compressão
ϵ_c	extensão de tração
γ	fator parcial de segurança
γ_{M0}	fator parcial relativo à secção transversal

ϕ	inclinação da alma em relação ao banzo
ρ_y	taxa de armadura do eixo yy
ρ	taxa de armadura; massa volúmica do betão seco
ρ_l	taxa de armaduras longitudinais
ρ_x	taxa de armadura no eixo xx

Letras Latinas Maiúsculas

A_c	área da secção transversal do betão
$A_{s,x}$	área de armadura na direção xx
$A_{s,y}$	área de armadura na direção yy
A_{sl}	área de armadura na zona tracionada
A_{sl}	área de armadura na zona tracionada
A_p	área de chapa colaborante
A_{pe}	área efetiva da chapa colaborante
$C_{Rd,c}$	coeficiente de redução
L	comprimento
C_p	comprimento do perímetro crítico onde se prevê ocorrer a rotura por punçoamento
L_p	distância entre a resultante da carga e o apoio mais próximo
L_s	distância entre apoios
LN_{pl}	eixo neutro plástico
N_{cf}	força de compressão do betão
N_c	força de compressão no betão situado na nervura
$N_{p,pl}$	força de plastificação da secção efetiva da chapa
$N_{p,c}$	força de plastificação da secção efetiva da chapa à compressão
$N_{p,t}$	força de plastificação da secção efetiva da chapa à tração
N_s	força de tração na armadura
N_s	força de tração na armadura
V_{ed}	força longitudinal da secção mista
P_u	força máxima aplicada
E_a	módulo de elasticidade do aço

E_{cm}	módulo de elasticidade secante do betão
$W_{el,min}$	módulo de flexão elástico mínimo da secção
$W_{eff,min}$	módulo de flexão mínimo da secção transversal efetiva
$W_{pe,pl}$	módulo de flexão plástico da área efetiva da chapa
I_p	momento de inércia da chapa colaborante
I_{eq}	momento de inércia da laje mista
$I_{eq,2}$	momento de inércia da secção fendilhada
$I_{eq,1}$	momento de inércia da secção não fendilhada
M_{pa}	momento fletor resistente plástico da chapa
M_{pr}	momento resistente plástico reduzido da chapa de aço
$P_{pb,Rd}$	resistência de um perno de cabeça soldado a uma chapa colaborante
V_u	resistência última ao esforço transversal por unidade de largura
I_s	segundo momento de inércia da armadura transversal
I_{eff}	valor da inércia efetiva da secção transversal da chapa colaborante
I_{eff}	valor da inércia efetiva da secção transversal da chapa colaborante
$V_{l,Rd}$	valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal
R_d	valor de cálculo da resistência
$V_{p,Rd}$	valor de cálculo da resistência ao punçoamento da laje mista
$V_{l,Rd}$	valor de cálculo da resistência ao corte longitudinal
E_d	valor de cálculo do efeito das ações
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal atuante
$V_{z,ed}$	valor de cálculo do esforço transversal máximo
$V_{w,Rd}$	valor de cálculo do esforço transversal resistente da alma obtido de acordo com a EN 1993-1-3.
M_{ed}	valor de cálculo do momento fletor atuante
M_{Rd}	valor de cálculo do momento fletor resistente
$M_{f,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico, considerando a secção transversal constituída pela área efetiva dos banzos e pela área total da alma, independentemente da classe da secção
$M_{pl,Rd}$	valor de cálculo do momento fletor resistente plástico, considerando a secção transversal constituída pela área efetiva dos banzos e pela área total da alma, independentemente da classe da secção
$M_{pl,Rd}$	valor de cálculo do momento plástico resistente da secção composta

$V_{p,Rd}^{min}$	valor de cálculo mínimo da resistência ao punçoamento
N_c	valor mínimo entre a resistência à compressão da laje de betão com espessura h_c e a resistência à tração da chapa colaborante
L_s	vão de corte

Letras Latinas Minúsculas

a	distância entre eixos do perno e a extremidade da chapa
a_m	largura da distribuição da carga
b	largura unitária da laje
b_0	largura média das nervuras
b_{em}	largura efetiva da laje
b_m	largura de uma laje mista em que se considera uma carga distribuída
b_p	largura da área carregada
b_r	largura do topo das nervuras do perfil da chapa de aço
b_s	distância entre os centros de nervuras adjacentes da chapa de aço perfilado
b_w	somatório da largura das nervuras
c	volume absoluto do cimento, por unidade de volume aparente de betão
d	distância entre centro de gravidade da chapa colaborante e o topo da camada de betão
d_{d0}	diâmetro do anel de soldadura
d_p	altura média da laje mista
f_{bv}	valor de tensão tangencial considerando a encurvadura
f'_c	resistência à compressão do betão
f_{ck}	tensão característica de compressão
f_{ck}	valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias
f_{sk}	valor característico da resistência à deformação de aço de reforço
f_{yb}	valor nominal da tensão de cedência do aço
$f_{yp,d}$	valor de cálculo da tensão de cedência do aço da chapa colaborante
h	altura total da secção transversal
h_c	espessura do betão da laje cima da chapa colaborante
h_{c1}	primeira camada de betão na lâmina de compressão

h_f	espessura da camada de revestimento da laje mista sob a área carregada
h_f	espessura da camada de revestimento da laje mista sob a área carregada
h_p	altura total do perfil da chapa colaborante
h_t	altura total da laje
h_w	altura da alma entre as linhas médias dos banzos
k	fator empírico para cálculo da resistência ao corte longitudinal
l_{bc}	comprimento de apoio
l_{bs}	comprimento de apoio
m	fator empírico para cálculo da resistência ao corte longitudinal
m_{Ed}	momento fletor
m_{Rd}	momento fletor resistente
m_{trans}	momento transversal por unidade de comprimento
n	número de conectores sobre o apoio, valor médio do coeficiente de homogeneização
p	peso próprio da chapa colaborante e do betão
s	espaçamento de varões da armadura de distribuição; volume absoluto de qualquer adição utilizada; distância entre dispositivos de transferência de esforço transversal
s_d	comprimento total da alma
s_p	comprimento maior da zona reta da alma
s_w	distância medida em linha reta entre as extremidades da alma
t	espessura
t	espessura da chapa colaborante
z	braço do binário as forças interiores
z_e	posição do eixo neutro elástico
z_{pl}	distância entre o eixo neutro plástico da secção transversal da laje mista e a fibra extrema do betão à compressão
w	carga aplicada

Índice

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE.....	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação.....	3
2. LAJES MISTAS	5
2.1. Enquadramento.....	5
2.2. Vantagens e Desvantagens.....	10
2.3. Materiais	11
2.3.1. Aço.....	11
2.3.1.1. Chapa colaborante.....	11
2.3.1.2. Armaduras ordinárias.....	13
2.3.1.3. Conectores.....	14
2.3.2. Betão.....	15
2.4. Comportamento.....	16
2.5. Aplicações.....	18
2.6. Disposições Construtivas	19
3. DIMENSIONAMENTO	25
3.1. Bases de cálculo	25

3.1.1.	Ações	26
3.1.1.1.	Ações para chapas perfiladas utilizadas como cofragem	26
3.1.1.2.	Ações para lajes mistas	28
3.2.	Verificação da segurança das chapas perfiladas utilizadas como cofragem	28
3.2.1.	Análise da secção transversal das chapas perfiladas	28
3.2.2.	Verificação da segurança aos estados limites últimos	29
3.2.3.	Verificação da segurança aos estados limites de utilização	33
3.3.	Verificação da segurança da laje mista	34
3.3.1.	Idealização da Estrutura	35
3.3.1.1.	Largura efetiva de laje para cargas concentradas lineares	35
3.3.2.	Resistência da secção	38
3.3.2.1.	Verificação da segurança aos estados limites últimos	38
3.3.2.2.	Estado limite último de Flexão	39
3.3.3.	Momento fletor positivo	41
3.3.4.	Momento fletor negativo	44
3.3.4.1.	Estado limite último de Esforço Transverso	46
3.3.4.2.	Estado limite último de Corte Longitudinal	47
3.3.4.3.	Estado limite último de Punçoamento	50
3.3.5.	Estados limites de serviço	52
3.3.5.1.	Fendilhação	52
3.3.5.2.	Deformação	53
3.3.5.3.	Vibração	57
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
4.1.	Introdução	58
4.2.	Planeamento dos ensaios e geometria dos modelos	58
4.3.	Materiais	59
4.3.1.	Chapa de aço colaborante	59
4.3.2.	Betão leve	60
4.3.3.	Armaduras ordinárias	62
4.4.	Ensaio	62
4.4.1.	Preparação dos ensaios	62
4.4.2.	Instrumentação	64
4.4.3.	Planeamento e execução	65
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
5.1.	Resultados	68

5.1.1.	Resumo dos resultados obtidos	68
5.1.2.	Ensaio instrumentado.....	69
5.1.3.	Modos de rotura.....	73
5.1.4.	Curvas carga / deslocamento	73
5.2.	Discussão dos resultados obtidos.....	75
5.3.	Comparação com resultados de referência	79
6.	CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
6.1.	Principais conclusões.....	81
6.2.	Desenvolvimentos futuros.....	82
	BIBLIOGRAFIA.....	83
	ANEXOS.....	85

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O conceito de estruturas mistas teve origem nas civilizações antigas, na fabricação de tijolos de barro reforçados com palha, sendo o primeiro elemento estrutural com estrutura mista utilizado pelos Assírios. Contudo o termo estruturas mistas aparece em meados do século XIX, tal como conhecido atualmente (Calado & Santos, 2010; Stark, 1978).

O termo *elemento misto* aparece associado aos conceitos “estrutura mista”, “laje mista”, “viga mista”, entre outros, que segundo o Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1, 2004), “*é um elemento estrutural com componentes de betão e de aço estrutural interligados de modo a limitar o escorregamento longitudinal e a separação entre eles*”.

Uma estrutura mista é constituída por elementos estruturais de secção mista, ou seja, secções na qual estão ligados dois ou mais materiais, trabalhando em conjunto, o que permite obter elementos estruturais com comportamento resistente diferente do dos materiais individuais.

As estruturas mistas podem ser classificadas em vários tipos, nomeadamente madeira-aço, madeira-betão e aço-betão. Em Portugal podem ser encontradas estruturas mistas aço-betão em diversas soluções de engenharia, quer na reabilitação e reforço de estruturas existentes, quer na construção de estruturas novas.

Usualmente, a construção destes elementos recorre à utilização de betão de densidade normal, sendo que ao longo dos últimos anos devido aos avanços tecnológicos e a novas exigências construtivas, o desenvolvimento de novos materiais proporcionou a introdução do betão leve e betão de alta resistência em elementos mistos. Foram aperfeiçoadas técnicas de aplicação dos mesmos como, por exemplo, o aço-BEAL (Betão Estrutural de Agregados Leves) e aço-BAR (Betão de Alta Resistência), tendo sido também desenvolvidas novas teorias de cálculo para o controlo de estruturas mistas (*e.g.* cálculo das ligações entre materiais, análise elasto-plástica, entre outros).

Na prática, criou-se a oportunidade de dimensionar lajes mistas de aço-betão BEAL, suportada por uma boa base teórica.

Uma laje mista consiste na combinação de uma chapa de aço colaborante, geralmente galvanizada, sobreposta por uma camada de betão. Para aumentar a resistência ao corte

longitudinal, na interface aço/betão são usualmente utilizados conectores, como ilustrado na Figura 1.

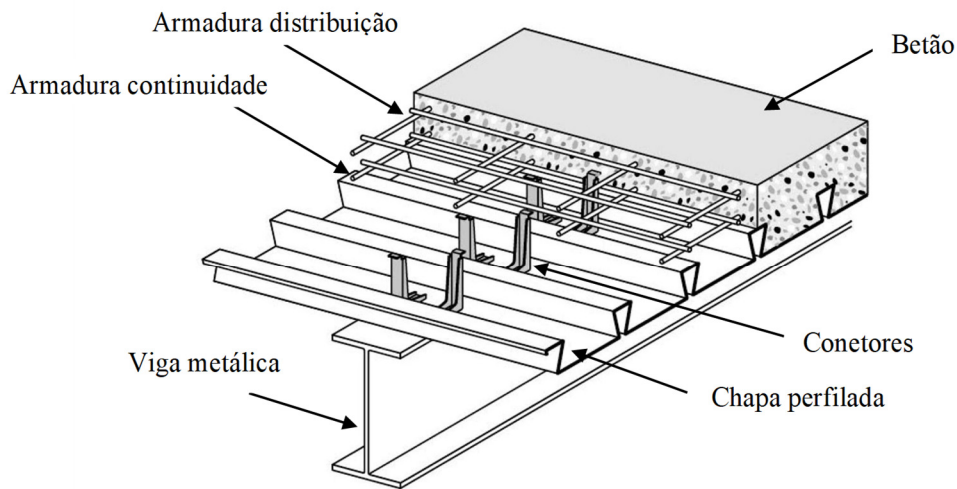


Figura 1 – Pormenor tipo de uma laje mista (Fonte: Catálogo “O Feliz”)

Apesar das distintas características entre o betão e o aço, a utilização conjunta destes materiais permite melhorar os seus desempenhos quando utilizados nas estruturas mistas. De facto, o betão é eficiente à compressão, evitando os fenómenos de instabilidade, ou seja, diminui os deslocamentos indesejáveis dos elementos de aço. O aço sendo eficiente à tração, fornece ductilidade à estrutura. Além disso, é importante salientar que tanto o betão como o aço apresentam coeficiente de dilatação térmica linear semelhante.

Após o endurecimento do betão, os diversos elementos constituintes funcionam em conjunto, dando origem a um elemento laminar plano destinado a suportar cargas e com capacidade para transmitir as ações horizontais.

Face ao exposto, é perceptível que neste tipo de modelo construtivo, os materiais utilizados (o betão e o aço) sejam colocados de forma estratégica onde realmente são necessários. Desta forma, o betão deverá ser aplicado de forma a resistir às forças de compressão, sendo aplicado sobre a chapa de aço colaborante, local onde são esperadas estas forças. Com a análise da composição do betão, deverá ser conseguida a resistência ideal necessária de forma a garantir segurança aos esforços causados pela utilização da estrutura.

Assim, o aço resiste somente às forças de tração e o betão às forças de compressão, fazendo com que cada material esteja a resistir a esforços para o qual têm maior aptidão.

O aparecimento de lajes mistas veio combater algumas dificuldades que se verificam na construção de outras soluções tradicionais. A utilização de lajes mistas aço-BEAL permite uma estrutura de menor peso, com uma construção mais célere e mais simples, proporcionando assim uma melhor resposta às ações sísmicas e uma versatilidade construtiva para aplicação em qualquer tipo de edifício. Neste contexto são soluções atualmente muito adotadas na reabilitação estrutural de edifícios principalmente quando são utilizadas estruturas metálicas.

1.2. Objetivos

Esta dissertação visa desenvolver uma metodologia de dimensionamento de lajes aligeiradas mistas aço-BEAL.

Com este trabalho procura-se igualmente:

- estudar os materiais (i.e., chapa colaborante, betão estrutural de agregados leves de forma individual de modo a perceber as características, as propriedades físicas e mecânicas, e respetiva normalização;
- análise do comportamento dos materiais quando aplicados em conjunto;
- avaliar o comportamento na interface aço / betão e os respetivos modos de rotura.

Para atingir estes objetivos foi desenvolvido um programa experimental em que foram construídas e ensaiadas 8 lajes até à rotura.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação apresentar-se-á formalmente estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 1 é feito um enquadramento da utilização de lajes mistas em estruturas novas e na reabilitação ou reutilização de estruturas existentes. Para além disso, apresentar-se-ão os objetivos do trabalho realizado, focando no dimensionamento de lajes mistas com cofragem colaborante e indica-se a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são definidas as características e propriedades dos materiais utilizados na construção de lajes mistas aço-BEAL e analisa-se sua função, quando aplicados e o seu sistema construtivo.

No Capítulo 3 são evidenciadas as bases e regras gerais para o dimensionamento das lajes mistas, bem como toda a metodologia de dimensionamento para os estados limites últimos e estados limites de serviço. No final são apresentados exemplos de aplicação de lajes mistas aço-BEAL.

No Capítulo 4 apresenta-se o trabalho experimental bem como as explicações sobre as opções tomadas.

No Capítulo 5 apresentam-se e discute-se todos os resultados obtidos do estudo experimental.

Por último, no capítulo 6, apresentão-se as principais conclusões bem como as respetivas propostas para desenvolvimentos futuos.

e o efeito misto entre os materiais era realizado por contacto simples. Nos Estados Unidos foram também utilizados varões de aço soldados à alma da chapa para garantir a resistência ao corte longitudinal (Lopes, 2005).

O aumento de custo associado a este sistema adotado para aumentar a resistência ao corte longitudinal, durante a década de 60, as empresas fabricantes de chapas de aço, desenvolveram modelos de chapas perfiladas com saliências nas almas, de modo a assegurar a ligação mecânica entre o betão e o aço. Os tipos de chapas desenvolvidos foram a chapa colaborante trapezoidal e reentrante.



Figura 3 – Tipos de chapa colaborante: a) trapezoidal e b) reentrante (Szumigala, Szumigala, & Polus, 2017)

A chapa trapezoidal, desenvolvida pela empresa Inland-Ryerson, permitiu incrementar a aderência entre o betão e o aço pelo aumento de aderência na chapa (Sputo, 2012).

Com o objetivo de conhecer a resistência destas, face às exigências dos edifícios onde seriam aplicadas, foi necessária a realização de alguns estudos.

Em 1964, Bryl, baseou-se nas tensões máximas admissíveis, considerando o comportamento elástico não fissurado do betão, sugerindo um método de dimensionamento. Este método foi utilizado até à década de 80 no cálculo de lajes mistas com chapas colaborantes sem saliências (Crisinel, Fidler, & Daniels, 1986).

Em 1967 o American Iron and Steel Institute (AISI) em parceria com a universidade de Iowa, desenvolveram um projeto com o objetivo de estabelecer as bases de projeto e dimensionamento de lajes mistas, através de um extenso programa experimental que contemplou ensaios de flexão de 3 e 4 pontos de 353 lajes mistas aço-betão com diferentes configurações para determinação dos parâmetros m e k para dimensionamento. Os autores deste estudo observaram três modos de rotura neste tipo de lajes: i) rotura por corte longitudinal; ii) rotura por flexão de uma secção pouco reforçada; e iii) rotura por flexão de uma secção reforçada (Porter & Ekberg, 1975). Os ensaios realizados por estes autores

demonstraram que o modo de rotura mais frequente é a rotura por insuficiente resistência ao corte longitudinal.

Schuster, em 1970, realizou ensaios de flexão de quatro pontos com duas linhas de carga analisando diferentes parâmetros tais como a espessura da chapa, o vão de corte e a secção da chapa.

Em resultado das investigações realizadas pelos autores anteriormente referidos, desenvolveram-se três equações para a verificação ao corte longitudinal, que relacionam o esforço transversal com as características geométricas das lajes e com as propriedades mecânicas dos materiais constituintes. As equações propostas de acordo com (Seleim & Schuster, 1985) foram as seguintes:

- Schuster (1970)

$$\frac{V_u s}{bd} = m \frac{d \sqrt{f'_c}}{L_s} + k \rho \quad (2.1)$$

- Porter e Ekberg (1975)

$$\frac{V_u s}{bd} = m \frac{d \rho}{L_s} + k \sqrt{f'_c} \quad (2.2)$$

- Seleim (1979)

$$\frac{V_u}{bd} = k_1 \frac{t}{L_s} + k_2 \frac{1}{L_s} + k_3 t + k_4 \quad (2.3)$$

em que:

V_u	resistência última ao esforço transversal por unidade de largura;
b	largura unitária da laje;
m, k, k_1, k_2, k_3, k_4	coeficientes determinados a partir de ensaios experimentais;
d	distância entre o centro de gravidade da chapa colaborante e o topo da camada de betão;
s	distância entre dispositivos de transferência de esforço transversal;
t	espessura da chapa colaborante;

f'_c	resistência à compressão do betão;
L_s	distância entre apoios;
ρ	taxa de armadura.

Na Figura 4 é ilustrado a título de exemplo os resultados obtidos nos ensaios realizados por Schuster (1970), num gráfico que relaciona V_{ue} / bd_p com $\sqrt{f'_c} d / L\rho$, verificando-se uma relação linear.

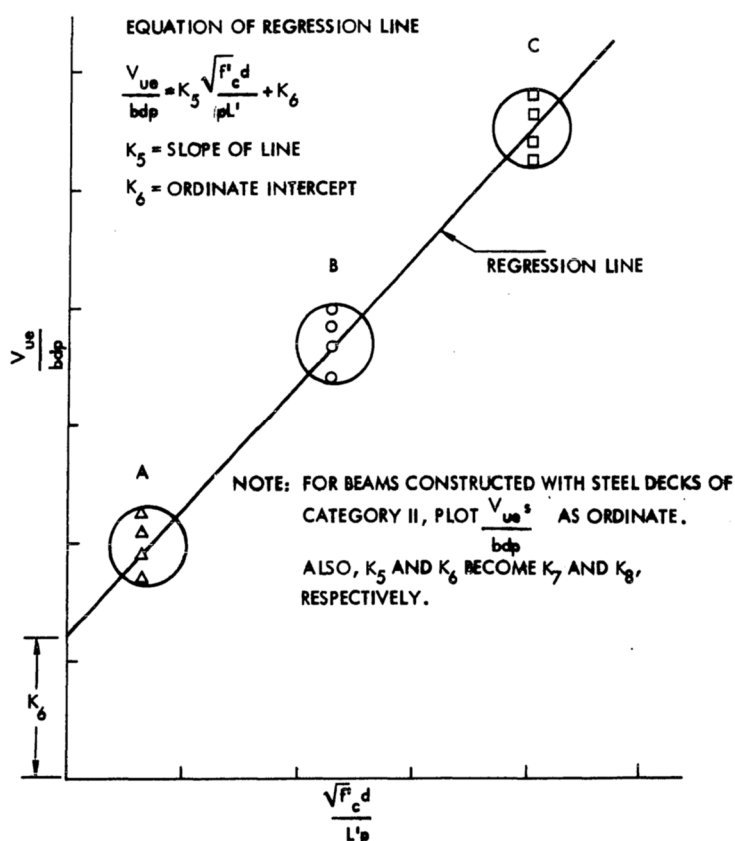


Figura 4 – Representação gráfica do comportamento de uma laje mista (Schuster, 1970)

Schuster concluiu que a resistência ao escorregamento era influenciada positivamente pelo aumento da espessura da chapa. Constatou ainda que só havia escorregamento entre o betão e a chapa no momento da rotura do elemento, não se verificando ao longo do ensaio, e que a largura do elemento não teve influência na sua capacidade resistente ao corte longitudinal.

Posteriormente, Seleim (Seleim S. S., 1979) otimizou as equações (2.1) e (2.3) com base nos resultados obtidos em 196 ensaios de lajes realizados na Universidade de Iowa e na

Universidade de Waterloo, concluindo que os métodos utilizados eram eficientes na previsão da resistência.

Com o objetivo de obter uma melhor previsão da resistência das lajes mistas quando aplicadas em edifícios, o *Steel Deck Institute* realizou um programa experimental na universidade de *West Virginia* que consistiu no ensaio até à rotura de 25 lajes adotando esquemas de ensaio com lajes simplesmente apoiadas e contínuas, utilizando chapa colaborante com saliências horizontais e verticais como única armadura. O objetivo dos ensaios foi avaliar a resistência ao corte longitudinal e as tensões nas fibras extremas da secção (Luttrell, 1987). Os autores concluíram que a rotura de lajes mistas com chapa colaborante com saliência ocorria de forma mais gradual comparativamente à utilização da chapa lisa, resistindo mesmo após a perda de adesão entre a chapa e a camada de betão. Concluíram que as saliências na chapa não só aumentavam a resistência da laje ao corte longitudinal, por interligação entre a chapa e o betão, como proporcionavam um aumento de rigidez na alma da secção.

Luttrell (1987) fez algumas observações relativamente às condições de apoio das lajes e a pormenorização adotada nas extremidades. O autor concluiu que as lajes contínuas tinham uma capacidade de carga superior, em 10% a 15%, comparativamente com as mesmas simplesmente apoiadas.

A conclusão que a resistência ao corte longitudinal depende pouco da resistência do betão à compressão foi confirmada por Luttrell (Luttrell, 1987) e posteriormente por Daniels *et al* (Daniels & Crisinel, 1988), devendo ao facto da rotura não ocorrer por esmagamento do betão mas pela separação da chapa de aço colaborante.

Daniels & Crisinel (1988) observaram igualmente outro modo de rotura menos frequente, a rotura por esforço transversal.

Posteriormente, Easterling *et al.* (Samuel Easterling & Young, 1992) realizaram estudos em lajes com a utilização de conetores de perno de cabeça e de cantoneira. O uso de amarrações de extremidade, quando utilizados em número adequado, melhorava significativamente o comportamento da laje, aumentando a resistência à flexão (Heagler, Luttrell, & Easterling, 1991).

Assim, segundo os estudos realizados, conclui-se que a resistência ao corte está dependente da aderência química entre o betão e o aço, a resistência mecânica fornecida pelas saliências e pelo atrito e a resistência fornecida pelas amarrações de extremidade quando aplicadas.

Devido aos avanços tecnológicos, na Europa, em 1994, foi publicado pelo European Committee for Standardization a EN 1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures, que estabelece as regras para o dimensionamento de estruturas mistas. Esta norma aborda vários tipos de elementos estruturais, nomeadamente, pilares, vigas e lajes mistas.

Posto isto, este trabalho foca-se maioritariamente no estudo do corte longitudinal em lajes mistas aço-betão.

Esta dissertação abordará apenas a temática das lajes mistas compostas por betão de agregados leves e chapa colaborante.

Com a análise da revisão da literatura, os autores concluem que o escorregamento por esforço transversal é o comportamento mais verificado nas lajes mistas e que uma das soluções mais eficaz é a aplicação de conectores na laje.

2.2. Vantagens e Desvantagens

Atualmente, a utilização de lajes mistas tem sido uma solução cada vez mais usada, pois apresenta um conjunto de vantagens quer em termos estruturais quer relativamente ao processo construtivo comparativamente a soluções tradicionais como as lajes de betão armado, das quais se podem salientar (Rackham, Couchman, & Hicks, 2009):

- Diminuição dos custos de construção: este facto deve-se à ausência ou diminuição de armadura inferior e escoramentos, ausência de cofragem, maior velocidade de construção o que implica uma economia de tempo e de custos;
- Facilidade na aplicação: as chapas de aço colaborante têm um tamanho exato, fáceis de cortar em obra, movimentar e montar. Os equipamentos necessários para a colocação a fixação da chapa são leves e de fácil utilização;
- Diferentes funções para a chapa colaborante: cofragem para a laje mista e plataforma de trabalho segura com a possibilidade de se trabalhar em vários pisos em simultâneo. Devido à forma de aplicação da chapa de aço, há o travamento lateral do banzo superior das vigas de aço. Há diminuição do peso do pavimento e alguns tipos de chapa colaborante permitem soluções de fixação de equipamentos e serviços;
- Flexibilidade: possibilidade de combinação com todos os tipos de estruturas, como de aço, de betão, de alvenaria e de madeira e a adaptação a qualquer geometria e abertura.

No entanto estas lajes têm a limitação dos vãos que podem ser adotados e as cargas a suportar comparativamente às lajes de betão armado.

2.3. Materiais

Numa laje mista aço-BEAL, os principais materiais utilizados são a chapa colaborante, as armaduras ordinárias e o betão leve. De forma a garantir um melhor desempenho, um aumento da resistência ao corte longitudinal e a ligação entre a chapa e o betão, podem igualmente ser utilizados conetores.

Para a colocação de lajes mistas, os apoios da chapa colaborante podem ser bastante variados abrangendo materiais de diferentes características como elementos de aço, betão, madeira ou alvenaria.

As propriedades relevantes dos materiais e as suas características são descritas em pormenor nas secções seguintes.

2.3.1. Aço

2.3.1.1. Chapa colaborante

Existem no mercado diversos tipos de chapas perfiladas (colaborantes), como ilustra a Figura 5, que podem ser utilizadas em lajes mistas, variando a geometria da nervura, as deformações da chapa como as bossas e os entalhes e o tipo de aço utilizado.

As chapas perfiladas podem ser agrupadas quanto ao seu tipo de perfil em:

- Perfil trapezoidal;
- Perfil reentrante;
- Perfil alto.

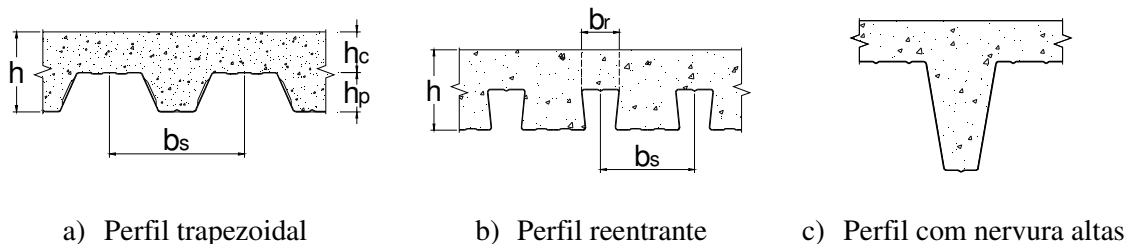


Figura 5 – Tipos de chapas perfiladas

As chapas existentes no mercado têm as seguintes características:

- Espessuras entre 0.60 mm e 1.00 mm;
- A altura da chapa, h_p (Figura 5a), está compreendida entre 70 mm e 114 mm;
- O valor da tensão de cedência do aço, f_{yp} , varia entre os 220 MPa e os 420 MPa.

A proteção contra a corrosão é conseguida através de zincagem nas duas faces com massa total de 275 g/m^2 , o que significa cerca de 0.05 mm para ambientes não agressivos (EN 10346, 2009).

A norma limita o campo de aplicação a chapas com perfis trapezoidais e reentrantes desde que as nervuras estejam pouco espaçadas entre elas e desde que verifique a seguinte expressão:

$$b_r / b_s \leq 0,6 \quad (2.4)$$

A área mínima de armadura recomendada para a armadura de distribuição nas duas direções, não deverá ser inferior a $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ em cada direção e deverá ser colocada na espessura de betão acima das nervuras, h_c . O espaçamento dos varões da armadura de distribuição, s , não deverá exceder o menor dos seguintes valores: $2h$ e 350 mm (ver Figura 6).

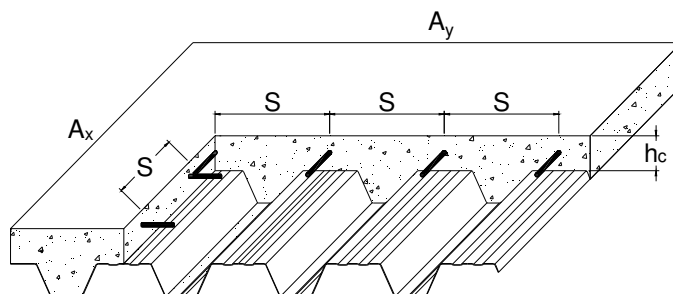


Figura 6 – Espaçamento dos varões da armadura de distribuição

No caso de cargas concentradas aplicadas deverá ser aplicada uma armadura transversal mínima para cargas que não excedam os seguintes valores:

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

A área desta armadura não deverá ser inferior a 0,2% da área de betão localizado acima das nervuras com uma largura igual à largura efetiva da laje mista, b_{em} , determinada no capítulo 3.3 deste trabalho.

Também ter-se-á em conta o comprimento de amarração dos varões que deverá ser para além desta largura conforme indicado na Figura 7.

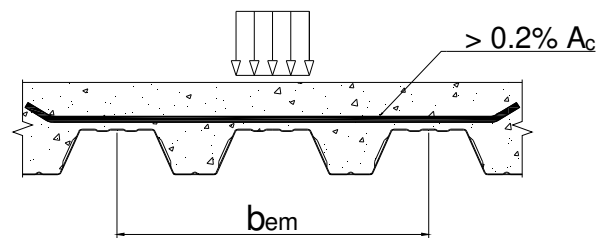


Figura 7 - Esquematização da armadura transversal mínima para cargas concentradas

2.3.1.2. Armaduras ordinárias

As armaduras ordinárias são utilizadas como armaduras de distribuição e armaduras de reforço. A armadura de distribuição numa laje mista, tem como função permitir uma melhor distribuição das cargas, controlar a fendilhação devido à retração e variações de temperatura e melhorar a resistência ao fogo. Esta armadura poderá ser constituída por armadura ordinária ou malhasol. Os elementos constituintes deste tipo de solução encontram-se representados na Figura 8.

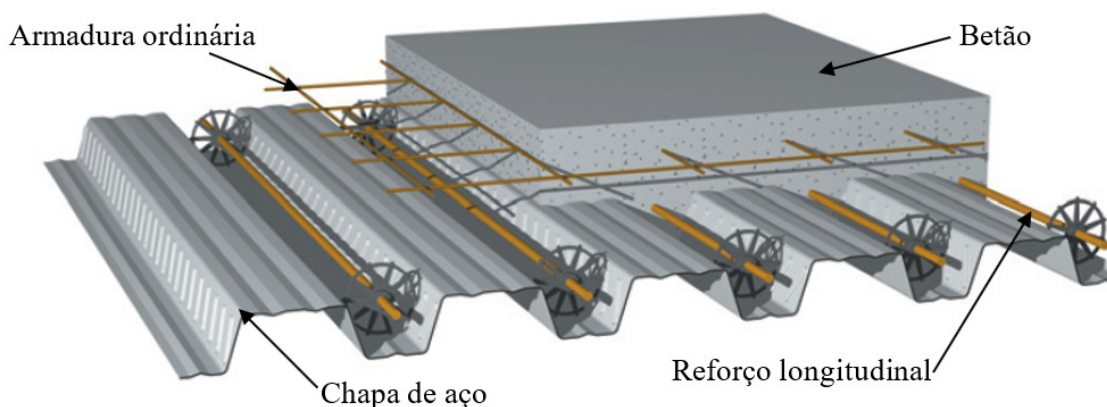


Figura 8 – Elementos constituintes de uma laje mista (ArcelorMittal, 2009)

Em lajes mistas contínuas será necessário adotar armaduras de reforço na zona dos apoios, disposta na face superior de modo a resistir aos momentos negativos. De acordo com o Eurocódigo 2 sempre que haja encastramento parcial ao longo de um dos bordos da laje, e não tenha sido considerado no dimensionamento, deve colocar-se igualmente uma armadura ordinária na parte superior da laje. De acordo com as cargas a suportar pode igualmente ser colocada uma armadura adicional a meio vão, na zona das nervuras, para aumentar a sua resistência aos momentos fletores positivos, como ilustrado na Figura 9.

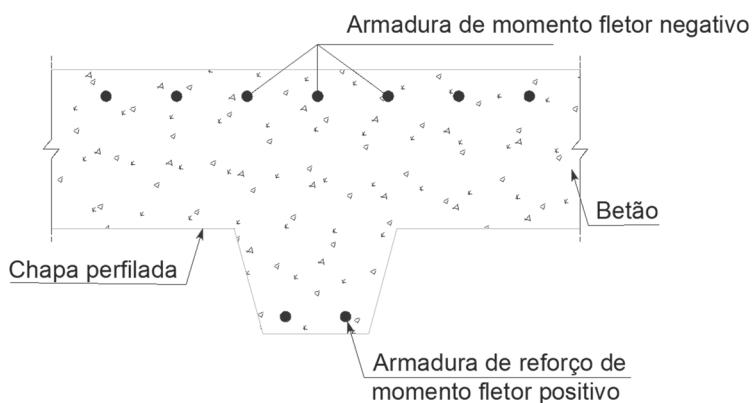


Figura 9 – Pormenor das armaduras de reforço longitudinais

2.3.1.3. Conectores

Como as lajes mistas são constituídas por materiais com propriedades resistentes e mecânicas distintas, originam-se forças de escorregamento na interface entre os mesmos devido à deformação diferencial entre ambos. Para combater este tipo de esforços internos,

poderá ser colocado na laje um elemento estrutural, denominado conector, melhorando o comportamento conjunto da estrutura. Este elemento poderá ser aplicado sob diversas formas. O Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1, 2004) indica os tipos de ligações utilizadas habitualmente em lajes mistas referindo a utilização de conectores metálicos que podem ser soldados ou de fixação mecânica.

Relativamente à aplicação dos pernos de cabeça, estes poderão ser soldados ou cravados na chapa de aço. Os requisitos relacionados com os elementos de ligação e os produtos para soldadura podem ser consultados na EN 1993-1-8 (NP EN 1993-1-1, 2010a), enquanto para os que se referem a outros tipos de ligação mecânica deve-se consultar a EN 1993-1-3 (EN 1993-1-3, 2006).

2.3.2. **Betão**

Nas lajes mistas normalmente é utilizado o betão normal e o betão leve. De acordo com as especificações do Eurocódigo 4 o betão deve apresentar uma classe de resistência superior à classe C20/25 para betões normais e a classe L20/22 para o betão leve. São igualmente apresentados valores limites para a retração por secagem.

Em obras de reabilitação de edifícios a utilização do betão leve, e para vãos correntes, pode ser uma mais valia para a diminuição da massa dos pavimentos e a redução das cargas transmitidas às fundações.

De acordo com o Eurocódigo 4, (EN 1994-1-1, 2004), a espessura total da laje, h , ilustrado na Figura 5, não deve ser inferior a 80 mm. A espessura de betão acima das nervuras da chapa, h_c , conforme a Figura 5, não deve ser inferior a 40 mm:

$$h \geq 80 \text{ mm} \text{ e } h_c \geq 40 \text{ mm}$$

Caso a laje faça parte de uma viga mista ou é utilizada como diafragma, a espessura total h não deverá ser inferior a 90 mm e h_c não inferior a 50 mm.

2.4. Comportamento

O comportamento das lajes mistas utilizando chapas perfiladas está diretamente relacionado com o grau de interação dos materiais, sendo normalmente observados três tipos de comportamento (Calado & Santos, 2010):

- Interação total entre o betão e a chapa colaborante: nesta situação não existem forças de escorregamento entre o aço e o betão e a força máxima aplicada atinge o seu máximo, P_u . Consoante o modo de rotura ocorra lentamente ou abruptamente, este pode ser dúctil ou frágil;
- Inexistência de interação entre o betão e a chapa colaborante: para esta situação não existe ligação entre os dois materiais, ou seja, a força de escorregamento apresenta o seu valor máximo enquanto o valor da força aplicada é mínimo. Desta forma, o modo de colapso é gradual;
- Interação parcial entre o betão e a chapa colaborante: para este caso, o valor da força de escorregamento e o valor da força aplicada situa-se entre zero e o valor máximo, podendo ser o modo de colapso dúctil ou frágil.

Estes comportamentos podem originar diferentes tipos de colapso dependendo da interação entre o betão e a chapa. Existem três modos de colapso distintos com secções críticas diferenciadas (Calado & Santos, 2010; Stark, 1978):

- Modo de colapso tipo I: deve-se essencialmente a uma capacidade resistente à flexão inferior à requerida. Ocorre frequentemente em lajes de médio e grande vão devido à flexão ser o esforço condicionante nestes casos, com graus de interação elevados entre o betão e a chapa, provocando a cedência total do aço. Este modo pressupõe uma capacidade de resistência ao corte longitudinal igual ou superior à força de tração instalada na chapa (primeiro troço da Figura 10);
- Modo de colapso tipo II: originado devido a uma deficiente capacidade de transmissão de esforços entre o betão e a chapa provocando o corte longitudinal do elemento. Pode ocorrer em lajes com vãos de qualquer dimensão pois a resistência ao corte longitudinal será inferior tanto à resistência à flexão quanto à resistência ao esforço transversal (segundo troço da Figura 10);

- Modo de colapso III: modo de rotura predominante em lajes de pequeno vão por esforço transversal excessivo ou concentração de cargas originando punçoamento. Este modo ocorre com pouca frequência devido a estes elementos possuírem uma elevada esbelteza (terceiro troço da Figura 10).

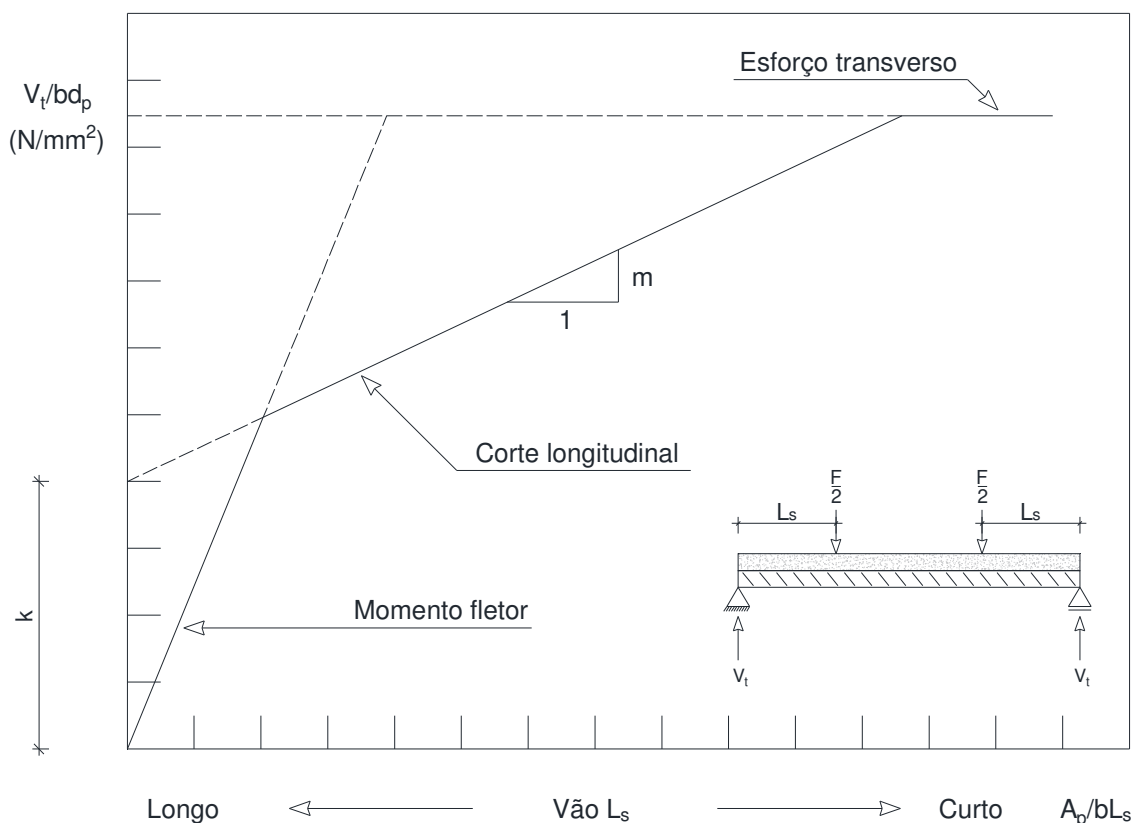


Figura 10 – Relação entre o modo de colapso e o vão da laje

Em 1978, Stark (Stark, 1978) apresentou também algumas conclusões acerca do comportamento de lajes mistas, classificando-o como dúctil ou frágil. Este autor enunciou que o comportamento frágil ocorre quando a resistência máxima à flexão é atingida logo após o início do escorregamento na interface entre a chapa e o betão, decrescendo rapidamente a capacidade de carga. Por sua vez, uma laje com comportamento dúctil continua a aumentar a capacidade de carga mesmo depois de iniciar o escorregamento. O mesmo autor concluiu que lajes mais espessas apresentam comportamentos mais frágeis e o aumento da curvatura da laje explica que o betão e o aço deixaram de ter um eixo neutro comum.

O Eurocódigo 4-parte 1 (EN 1994-1-1, 2004) indica que o comportamento dúctil ocorre quando a carga de rotura é superior em 10% à carga que provoca o escorregamento de extremidade de 0.1 mm.

2.5. Aplicações

Este tipo de soluções construtivas é maioritariamente utilizado em edifícios de estrutura metálica destinados a serviços ou comércio. Contudo, este método construtivo pode ser adequado a outro tipo de utilizações, nomeadamente (Rackham et al., 2009):

- Indústria e armazéns;
- Hospitais;
- Escolas;
- Cinemas;
- Habitação;
- Projetos de reabilitação.

Na Figura 11 pode ser visto uma solução utilizada num edifício comercial localizado em Leiria constituída por laje mista com chapa colaborante assente sobre uma estrutura metálica porticada.



Figura 11 – Edifício comercial com laje mista (arquivo pessoal)

Na Figura 12 está representada a mesma solução, numa reabilitação de um edifício com estrutura mista betão armado e estrutura metálica.



Figura 12 – Laje mista utilizada em reabilitação / mudança de utilização(arquivo pessoal)

2.6. Disposições Construtivas

Muitas das disposições construtivas são baseadas na prática corrente, não sendo forçosamente apoiadas em bases teóricas. O Eurocódigo 4 apresenta algumas disposições construtivas relativamente às lajes mistas. As disposições do betão armado podem ser consultadas na NP ENV 13670-1:2010 e nas disposições relativas ao aço estrutural encontram-se na NP EN 1993-1-1 (NP EN 1993-1-1, 2010b).

Segundo as indicações de The Steel Construction Institute, a metodologia de aplicação de lajes mistas, segue as seguintes atividades (Rackham et al., 2009) conforme indicado na Tabela 1:

Tabela 1 – Fases do processo construtivo

Ordem de trabalhos	Tipo de trabalhos
1º	Receção dos materiais
2º	Içamento
3º	Distribuição
4º	Espalhamento
5º	Escoramento nas áreas necessárias
6º	Fixação da chapa colaborante
7º	Aplicação de conetores quando necessário
8º	Fixação dos arremates
9º	Aplicação da fita adesiva nas juntas
10º	Malha anti fissuração
11º	Proteção das áreas de corte
12º	Colocação das mestras
13º	Betonagem

A dimensão nominal dos agregados, depende sempre da menor dimensão do elemento estrutural (ver Figura 13) em que o betão é colocado, não devendo ultrapassar o menor dos seguintes valores:

- $0,40 h_c$;
- $b_0/3$, em que b_0 é a largura média das nervuras;
- 31,5 mm (peneiro C 31,5).

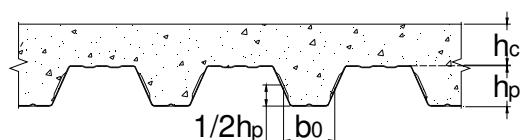


Figura 13 – Relação da dimensão nominal dos agregados e a dimensão do elemento estrutural

O comprimento dos apoios deve ser o suficiente de forma a garantir uma correta fixação da chapa colaborante aos apoios, impossibilitando qualquer ocorrência de colapso ocasional de um movimento acidental durante a construção. Este artigo esclarece ainda que a sobreposição de algumas chapas perfiladas de aço não pode ser praticável. A largura dos apoios l_{bc} e l_{bs} , como ilustra a, Figura 14, não deverão ser inferiores aos seguintes valores:

- Para lajes mistas apoiadas sobre apoios de betão ou aço:

$$l_{bc} \geq 75mm \text{ e } l_{bs} \geq 50mm$$

- Para lajes mistas sobre apoios de outros materiais:

$$l_{bc} \geq 100mm \text{ e } l_{bs} \geq 70mm$$

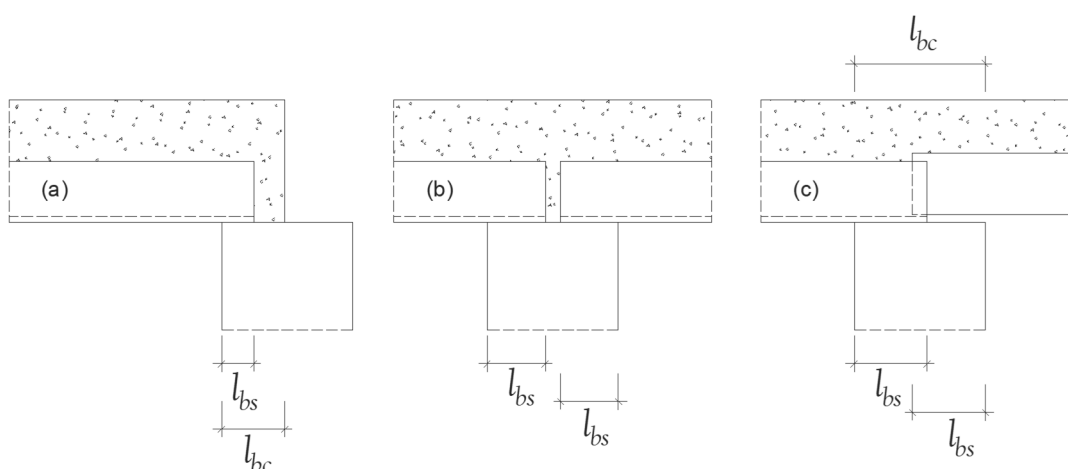
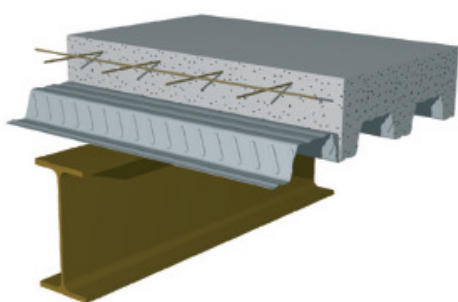
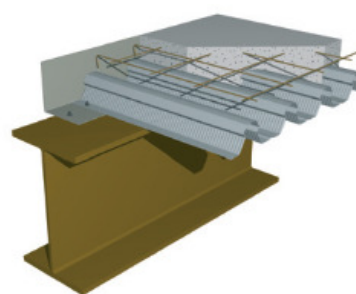


Figura 14 – Comprimento mínimo nos apoios (adaptado de EN 1994-1-1, 2004)

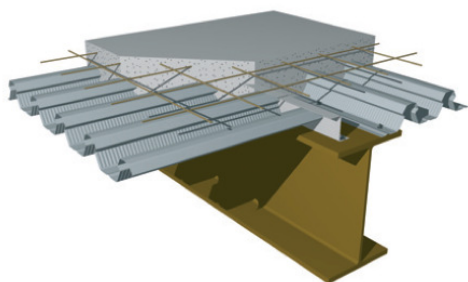
Para a colocação de lajes mistas, a sua ligação aos apoios é uma das fases construtivas mais importantes e que devem seguir as regras de boa execução. Os apoios da chapa colaborante podem ser bastante variados abrangendo materiais de diferentes características como elementos de aço, betão, madeira ou alvenaria. A Figura 15 ilustra algumas soluções correntemente adotadas na colocação deste tipo de lajes com especial incidência para os diferentes tipos de apoio.



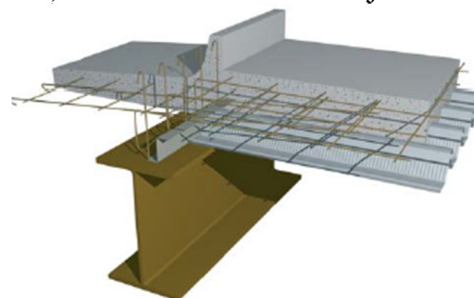
a) Apoio intermédio – metálico



b) Extremidade de uma laje mista



c) Mudança de direções nas chapas colaborantes



d) Consola

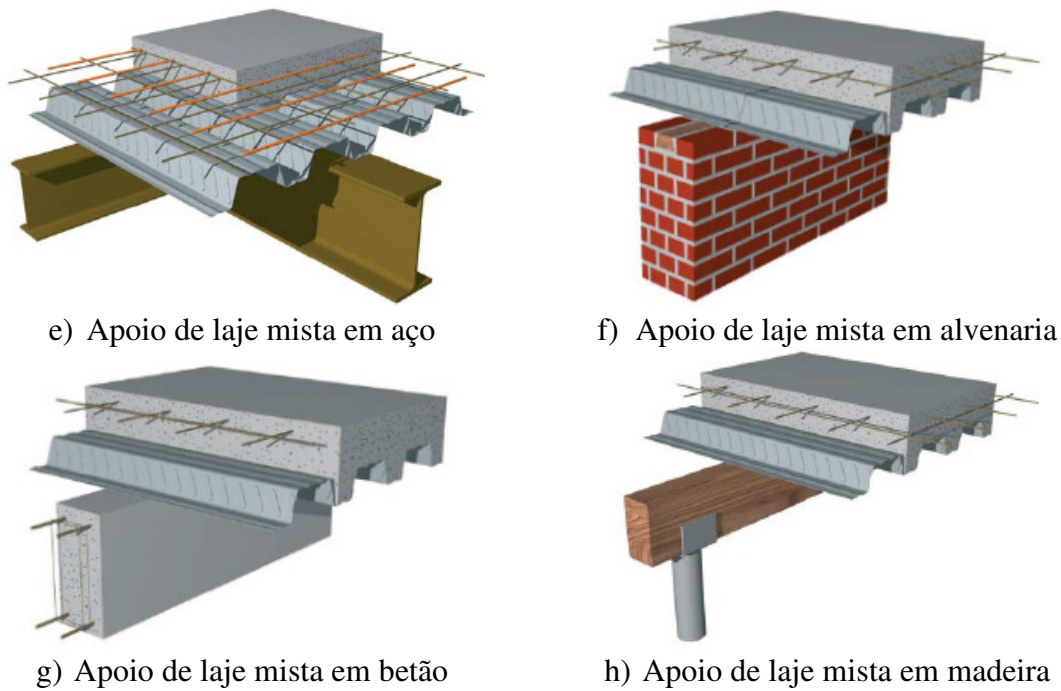


Figura 15 – Disposições construtivas de lajes mistas (ArcelorMittal, 2009)

Deve ainda ter-se especial cuidado na execução de lajes durante a forma como se procede à betonagem em especial as seguintes situações (Calado & Santos, 2010):

- Colocar o betão o mais próximo possível da chapa colaborante;
- Evitar as acumulações e os montes de betão;
- Utilizar preferencialmente betão bombeado;
- Efetuar uma vibração moderada do betão.

Em vãos superiores a 3 m e de modo a evitar a utilização de escoramentos, a betonagem da laje pode ser executada em duas fases (Calado & Santos, 2010):

- 1) A chapa colaborante resiste ao seu peso e ao peso da camada de betão h_{c1} ;
- 2) A laje mista de espessura $h_p + h_{c1}$, resiste ao restante peso próprio da laje (Figura 16).

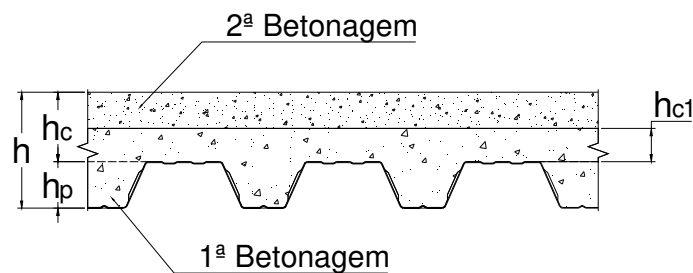


Figura 16 – Execução de laje mista em duas fases (adaptado de (Calado & Santos, 2010))

Enquanto processo de construção, quando o pavimento metálico serve como cofragem é de ter principal atenção a circulação sobre o perfil, fazendo este e plataforma de trabalho e a colocação e espalhamento do betão. De forma a reduzir temporariamente o vão de utilização do perfil durante a fase de betonagem e cura parcial do betão, pode ser favorável a colocação e um apoio provisório a meio vão entre duas vigas. É importante escorar todas as consolas para prevenir o perigo de queda por escorregamento.

A betonagem é feita por métodos tradicionais, nomeadamente, bombagem ou balde com betão, certificando-se sempre que não existe acumulação de betão fresco.

3. Dimensionamento

O dimensionamento de lajes mistas é baseado em fórmulas empíricas, com base nos resultados de ensaios experimentais ou com base nas prescrições da norma europeias (EN 1994-1-1, 2004).

No dimensionamento de lajes mistas com chapa colaborante, deve ser tido em conta o processo construtivo descrito no capítulo anterior, já que este influencia diretamente o seu comportamento nomeadamente a distribuição de tensões e as deformações da laje.

De acordo com as prescrições do Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1, 2004), de forma a garantir a segurança relativamente aos estados limites últimos e aos estados limites de utilização, o dimensionamento deve contemplar as seguintes situações:

- Fase Construtiva: Nesta fase é considerado que a chapa colaborante é utilizada como cofragem. Deve ser verificado o comportamento da chapa quando atua como cofragem do betão fresco, tendo em conta o efeito do escoramento, se necessário;
- Fase Mista: Nesta fase, deve verificar-se a laje do pavimento após o endurecimento do betão e após o levantamento do escoramento inicial.

Nas secções seguintes será apresentado os aspetos fundamentais no dimensionamento de lajes mistas.

3.1. Bases de cálculo

Tendo em conta o perfil da chapa colaborante, as lajes mistas são apenas resistentes na direção das nervuras, sendo no dimensionamento analisadas como lajes armadas numa só direção. As lajes mistas apoiam-se, de um modo geral, em vigas secundárias que transmitem o esforço para vigas principais, obtendo-se um sistema de vigas ortogonais.

O valor da largura das nervuras da laje colaborante está condicionado pela relação b_r/b_s , como definido na secção 2.6 deste documento. O limite recomendado para esta relação é de 0,6. Caso as nervuras sejam muito estreitas, a resistência ao corte dos conetores colocados dentro das mesmas deverá ser reduzida, afetando também os valores da resistência ao esforço transversal. Caso as nervuras sejam demasiado largas, a capacidade da laje para suportar

cargas pelas diversas nervuras pode ser desajustada, especialmente se a laje possuir a espessura mínima de forma a reduzir peso.

Na fase de serviço, é sempre a laje mista de espessura total h , que resiste às sobrecargas e às restantes cargas permanentes.

3.1.1. Ações

3.1.1.1. Ações para chapas perfiladas utilizadas como cofragem

Segundo a EN 1994-1-1, as ações que devem ser consideradas no dimensionamento para a verificação da chapa colaborante como cofragem são as seguintes:

- Peso próprio da chapa;
- Peso próprio do betão;
- Eventuais cargas de armazenamento;
- Sobrecargas de construção, incluindo a possível acumulação de betão no local durante a construção;
- Efeito de “poça”, ou seja, o aumento da espessura do betão devido às deformações das chapas.

Relativamente ao valor do peso volúmico do betão, γ , este varia conforme o estado, fresco ou endurecido, ou se tem algum material adicionado. O valor nominal do peso volúmico do betão armado a considerar na verificação das chapas deverá ser igual a 26 kN/m^3 , valor a considerar para o betão fresco de acordo com a NP EN 1991-1.

Para as sobrecargas de construção, a EN 1991-1-6 (2005), indica que deve ser utilizada uma carga uniformemente distribuída com o valor de 1 kN/m^2 representando o peso dos operários e de pequeno equipamento. Durante a fase de betonagem, deve ser considerado fora da zona de trabalho uma carga uniformemente distribuída de $0,75 \text{ kN/m}^2$ e na zona de trabalho de $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, ou o comprimento do vão se for inferior, deve ser considerada uma sobrecarga uniformemente distribuída com o valor igual a 10% do peso próprio da laje mista, mas nunca inferior a $0,75 \text{ kN/m}^2$ nem superior a $1,50 \text{ kN/m}^2$, como ilustra a Figura 17 e resumido na Tabela 2.

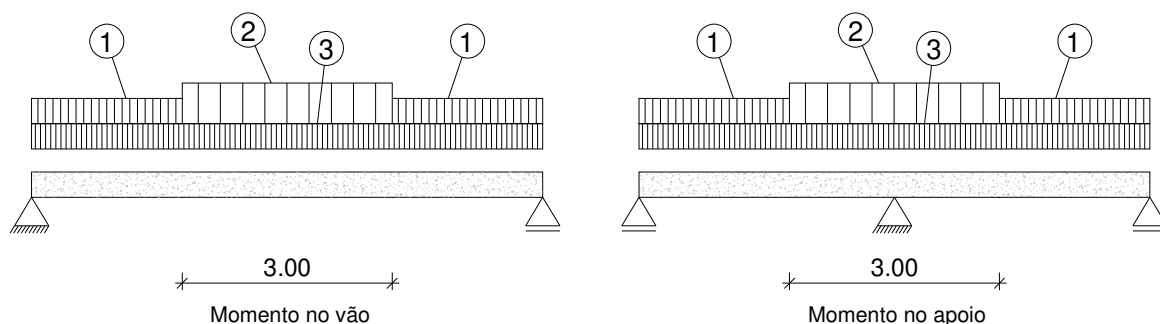


Figura 17 - Sobrecargas de construção para chapas perfiladas utilizadas como cofragem

Tabela 2 - Sobrecargas de construção para chapas perfiladas utilizadas como cofragem

Ação	Área carregada	Sobrecarga (kN/m ²)
1	Fora da área de trabalho	0,75
2	Dentro da área de trabalho de 3m x 3m (ou o comprimento de vão se for inferior)	10 % do peso próprio do betão, desde que não inferior a 0,75 nem superior a 1,5.
3	Toda a área	Peso Próprio

O valor implementado para as sobrecargas de construção pode não ser suficiente, devido à possibilidade de haver um grande impacto na alteração da betonagem correspondente, por exemplo, à pressão elevada do sistema de bombagem. A BS 5950-4 (1994) assinala que se deve utilizar uma carga uniformemente distribuída em toda a laje de valor igual a 1,50 kN/m². Visto que a chapa de aço irá funcionar como plataforma de trabalho, esta deverá resistir a cargas concentradas que simulem os operários.

Devido à colocação do betão fresco sob a chapa de aço, a deformação causada na chapa pode originar a meio vão uma deformação, que não pode ser desprezada. Assim, o artigo 9.3.2 (2) da EN 1994-1-1 indica que, a flecha a meio vão da chapa, δ , devido ao seu peso próprio e ao peso do betão fresco, se for superior a 1/10 da espessura da laje, o efeito de “poça” deve ser considerado, admitindo no cálculo um acréscimo da espessura nominal do betão ao longo de todo o vão de $0,7 \delta$. O limite para a qual deveria ser considerado o efeito de “poça” corresponde a uma valor de $L/250$, ou 20 mm, em que L é o vão da chapa. A norma salienta ainda que o efeito de “poça” não deve ser considerado para a verificação da resistência, sendo o aumento de espessura considerado para acréscimo de peso.

3.1.1.2. Ações para lajes mistas

A norma EN 1991-1-1 indica as ações a aplicar nas lajes mistas em edifícios. Das principais ações a ter em conta, distinguem-se as seguintes:

- Peso da chapa;
- Peso do betão;
- Outras ações permanentes (revestimentos, equipamentos, entre outras);
- Tetos falsos;
- Tubagens suspensas;
- Reações devidas à retirada de escoras;
- Fluência e retração.

3.2. Verificação da segurança das chapas perfiladas utilizadas como cofragem

3.2.1. Análise da secção transversal das chapas perfiladas

As chapas perfiladas que podemos encontrar no mercado, são de um modo geral esbeltas, pelo que se deve ter em conta a encurvadura local após a aplicação da carga.

Depois do início da encurvadura local, as tensões existentes na chapa colaborante sofrem uma redistribuição de tensões havendo, de modo a manter o equilíbrio, uma diminuição de tensões na zona central e um aumento na zona dos apoios. Desta forma, de modo a compreender exatamente a área que está sujeita ao esforço da redistribuição de tensões, será utilizado o conceito de largura efetiva. O cálculo das larguras efetivas é apresentado no Anexo A deste documento de acordo com (EN1993-1-5, 2006).

3.2.2. Verificação da segurança aos estados limites últimos

O procedimento dos trabalhos durante a fase de construção de uma laje mista é, de um modo geral, a fase mais condicionante para a escolha da chapa colaborante, visto que esta deverá suportar por si só o peso do betão fresco e das sobrecargas durante a construção.

Para a determinação da segurança das chapas perfiladas relativamente aos estados limites últimos, a EN 1994-1.1 refere que a verificação deve ser efetuada de acordo com a EN 1993-1-3, satisfazendo a seguinte condição:

$$E_d \leq R_d \quad (3.1)$$

em que:

E_d valor de cálculo do efeito das ações;

R_d valor de cálculo da resistência.

O eurocódigo 4 estabelece um conjunto de verificações a serem realizadas tanto para os estados limites de serviço como para os estados limites últimos da chapa colaborante. As verificações de estado limite último compreendem a flexão e corte vertical. No que diz respeito aos estados limites de serviço, é verificada a deformação dos elementos. Estas verificações de segurança encontram-se descritas nos seguintes subcapítulos.

No caso de a chapa estar sujeita unicamente a momento fletor, a verificação da segurança é realizada de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (3.2)$$

em que:

M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;

M_{Rd} valor de cálculo do momento fletor resistente.

Para secções de Classe 3, o valor de cálculo do momento fletor resistente é obtido de acordo com a seguinte expressão (NP EN 1993-1-1, 2010):

$$M_{Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el, \min} f_{yp}}{\gamma_p} \quad (3.3)$$

e para secções de Classe 4, o valor de cálculo do momento resistente é determinado através de (EN 1993-1-3, 2006)

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff, \min} f_{yp}}{\gamma_p} \quad (3.4)$$

em que:

- $W_{el, \min}$ módulo de flexão elástico mínimo da secção;
- $W_{eff, \min}$ módulo de flexão mínimo da secção transversal efetiva;
- γ_p fator parcial para ação de pré-esforço.

Na situação de haver chapas perfiladas contínuas, é na zona dos apoios internos que se encontra a zona mais condicionante, já que existe interação entre o momento fletor e o esforço transversal. Deste modo, é necessário reduzir o momento fletor resistente, caso a condição $V_{Ed} > 0,50V_{w,Rd}$ se verifique. A redução do momento fletor resistente é feita segundo a seguinte expressão:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1,0 \quad (3.5)$$

em que:

- M_{Ed} valor de cálculo do momento fletor atuante;
- M_{Rd} valor de cálculo do momento fletor resistente da secção transversal determinado de acordo com o artigo 6.1.4.1 da EN 1993-1-3;
- $M_{f,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico, considerando a secção transversal constituída unicamente pela área efetiva dos banzos, EN 1993-1-5;
- $M_{pl,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico, considerando a secção transversal constituída pela área efetiva dos banzos e pela área total da alma, independentemente da classe da secção, EN 1993-1-5;

$V_{w,Rd}$ valor de cálculo do esforço transversal resistente da alma obtido de acordo com a EN 1993-1-3. Caso a chapa tenha mais de uma alma, $V_{w,Rd}$, é a soma das várias almas;

V_{Ed} valor de cálculo do esforço transversal atuante.

O valor de $V_{w,Rd}$, é obtido a partir da seguinte expressão:

$$V_{w,Rd} = V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} t f_{bv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.6)$$

em que:

f_{bv} valor da tensão tangencial considerando a encurvadura de acordo com a

Tabela 3;

h_w altura da alma entre as linhas médias dos banzos, Figura 18;

ϕ inclinação da alma em relação ao banzo, Figura 18;

γ_{M0} coeficiente parcial, γ_M , cujo valor recomendado é 1,00 (EN 1993-1-1, 2010)

esbelteza normalizada da alma, $\bar{\lambda}_w$, pode ser obtida a partir das seguintes expressões (EN 1993-1-3, 2006)

- Almas sem reforços longitudinais:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E_a}} \quad (3.7)$$

- Almas com reforços longitudinais:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34}{k_\tau} \frac{f_{yb}}{E_a}} \quad (3.8)$$

mas

$$\bar{\lambda}_w \geq 0,346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E_a}} \quad (3.9)$$

e com k_τ igual a:

$$k_\tau = 5,34 + \frac{2,10}{t} \left(\frac{\sum I_s}{s_d} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

em que:

I_s valor do momento de inércia de cada um dos reforços isolados, em relação ao eixo $a-a$, como indica a figura 18;

s_d comprimento total da alma, Figura 18;

s_p comprimento maior da zona reta da alma, Figura 18;

s_w distância medida em linha reta entre as extremidades da alma;

t espessura da alma;

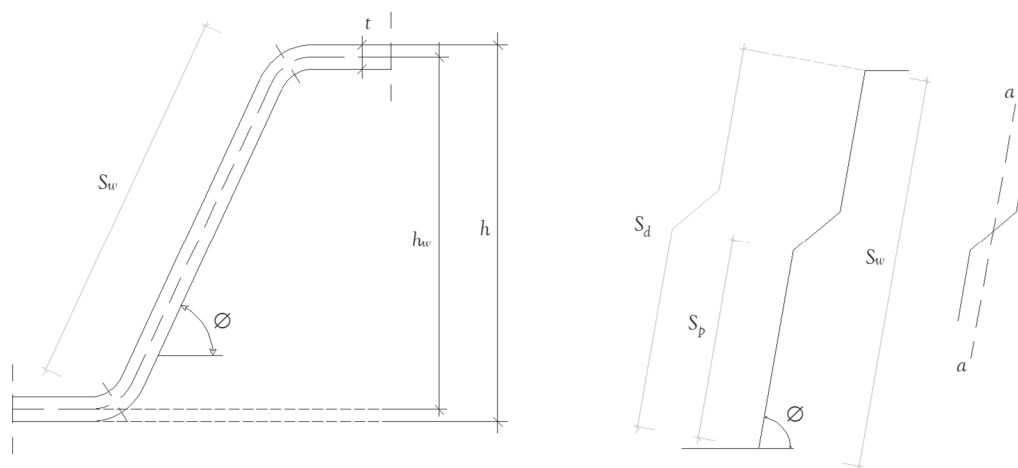


Figura 18 – Alma da chapa colaborante (EN 1993-1-3, 2006)

Tabela 3 – Tensão tangencial considerando a encurvadura f_{bv}

Esbelteza normalizada da alma	Alma sem reforços transversais nos apoios	Alma com reforços transversais nos apoios ⁽¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$\frac{0,48 f_{yb}}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{0,48 f_{yb}}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$\frac{0,67 f_{yb}}{\bar{\lambda}_w^2}$	$\frac{0,48 f_{yb}}{\bar{\lambda}_w}$
⁽¹⁾ Os esforços transversais nos apoios são para impedir a distorção da alma e devem ser dimensionados para resistir à reação do apoio.		

$\bar{\lambda}_w$ - esbelteza normalizada da alma

f_{yb} - valor nominal da tensão de cedência do aço

Caso seja necessário, deverá ser feita a verificação ao esmagamento da alma devido às reações nos apoios. Esta verificação deve ser efetuada segundo (EN 1993-1-3, 2006), em particular, onde será necessário analisar a resistência de almas sob a ação de forças transversais e à interação entre o momento fletor e as forças transversais.

3.2.3. Verificação da segurança aos estados limites de utilização

Relativamente à verificação dos estados limites de serviço, a *EN 1994-1-1* indica que as propriedades das secções devem ser determinadas a partir da *EN 1993-1-3*. Devido ao facto de a deformação máxima condicionar o dimensionamento das chapas perfiladas, a *1994-1-1* recomenda como valor limite para a deformação da chapa, devido ao seu peso próprio e ao peso do betão fresco, de $L/180$, sendo L o vão efetivo entre os apoios definitivos ou provisórios.

A determinação da flecha é realizada através da seguinte expressão, onde dever-se-ão utilizar as propriedades da secção calculadas de acordo com a *EN 1993-1-3*:

$$\delta_s = \frac{5}{384} \frac{pL^4}{E_a I_{eff}} \quad (3.11)$$

em que:

I_{eff} valor da inércia efetiva da secção transversal da chapa colaborante determinada de acordo com a EN 1993-1-3;

p peso próprio da chapa colaborante e do betão fresco. Se for necessário, deve-se considerar o efeito “poça”;

E_a módulo de elasticidade do aço estrutural.

3.3. Verificação da segurança da laje mista

De acordo com a EN 1994-1-1 no dimensionamento de lajes mistas aço-betão, poder-se-ão utilizar os seguintes métodos de análise global para a verificação em relação aos estados limites últimos:

- Análise elástica linear sem redistribuição de momentos nos apoios internos e considerando a fendilhação do betão nessas zonas;
- Análise elástica linear com ou sem redistribuição de momentos nos apoios internos. Caso se decida efetuar uma redistribuição de momentos para simular a fendilhação do betão, o valor máximo da redistribuição é de 30%, segundo o artigo 9.4.2 (3);
- Análise rígido-plástica, desde que se comprove que as secções onde são necessárias rotações plásticas devido à formação de rótulas plásticas, têm a capacidade suficiente de rotação;
- Análise elasto-plástica, onde se considera o comportamento não linear dos materiais.

No dimensionamento aos estados limites últimos, independentemente do método de análise global utilizado, geralmente desprezam-se os efeitos de escorregamento entre o betão e a chapa colaborante.

Em relação aos estados limites de serviço, dever-se-á utilizar, para a análise global da laje mista uma análise elástica linear (EN 1994-1-1, 2004). É importante fazer uma análise da flexão da chapa depois do endurecimento do betão para o cálculo da flexão total do piso em serviço. As ações resultantes da construção bem como as sobrecargas de aplicação não estão

presentes nesta verificação, o que leva a que a flexão determinada seja apenas devido a cargas permanentes.

3.3.1. Idealização da Estrutura

3.3.1.1. Largura efetiva de laje para cargas concentradas lineares

As lajes mistas apresentam capacidades limitadas para suportar paredes de alvenaria ou outras cargas localizadas, devido ao facto de resistirem apenas na direção das nervuras. Na EN 1994-1-1, estão definidas algumas regras de cálculo para determinar larguras de laje efetivas para resistir ao momento fletor e esforço transversal quando as lajes estão sujeitas a cargas concentradas.

Na Figura 19, está ilustrado um esquema da largura efetiva da laje mista para um carga pontual ou linear, paralelas ao vão da laje, distribuídas numa largura b_m , medida imediatamente acima das nervuras das chapas. O cálculo da largura b_m pode ser obtido pela seguinte expressão (EN 1994-1-1, 2004):

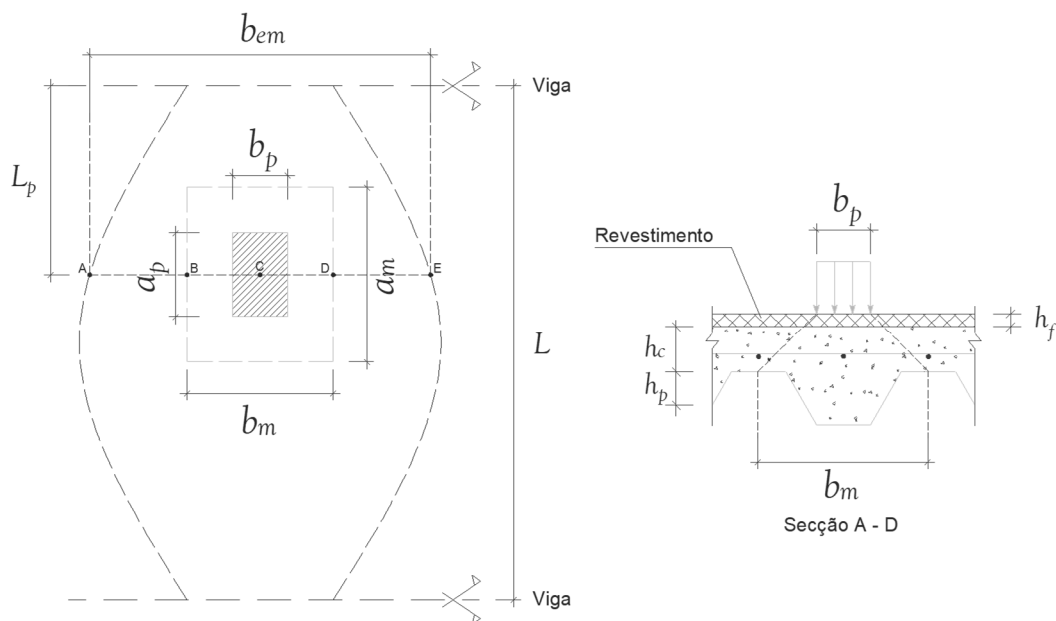


Figura 19 – Largura efetiva de uma laje mista com chapa colaborante sujeita a uma carga concentrada (Calado & Santos, 2010)

$$b_m = b_p + 2(h_c + h_f) \quad (3.12)$$

em que:

- b_p largura da área carregada;
- h_c espessura do betão da laje mista acima da chapa colaborante;
- h_f espessura da camada de revestimento da laje mista sob a área carregada.

A norma EN 1994-1-1 não refere a largura da distribuição da carga paralela ao vão da laje, sendo plausível admitir a mesma regra. Assim, a largura da distribuição da carga pode ser obtida a partir da expressão:

$$a_m = a_p + (h_c + h_f) \quad (3.13)$$

A menos de uma análise mais rigorosa e desde que $h_p/h \leq 0.6$, os esforços atuantes e os esforços resistentes, podem ser determinados considerando uma viga com os mesmos vãos, as mesmas condições de apoio e de espessura da laje e com uma largura efetiva determinada a partir das seguintes expressões (EN 1994-1-1, 2004):

- Momento fletor e corte longitudinal:
 - Vão simplesmente apoiado ou vão de extremidade de uma laje contínua:

$$b_{em} = b_m + 2L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \quad (3.14)$$

- Vãos internos de lajes contínuas:

$$b_{em} = b_m + 1,33 L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \quad (3.15)$$

- Esforço transversal:

$$b_{ev} = b_m + L_p \left(1 - \frac{L_p}{L}\right) \leq \text{largura da laje} \quad (3.16)$$

em que:

L_p distância entre a resultante da carga e o apoio mais próximo;

L vão da laje.

No caso de uma laje simplesmente apoiada de vão L e sujeita a uma carga concentrada, Q_{Ed} , aplicada no ponto A (ver Figura 19), o momento fletor máximo positivo por unidade de largura da laje, m_{Ed} , na secção BD é:

$$m_{Ed} = \frac{Q_{Ed} L_p}{b_{em}} \left(1 - \frac{L_p}{L} \right) \quad (3.17)$$

O momento m_{Ed} é máximo quando $L_p = L/2$.

A variação de b_{em} com L_p é indicada na Figura 19. Considera-se que a carga está uniformemente distribuída na largura BC, enquanto que a resistência é assegurada pela largura AD. Estes factos originam o aparecimento do momento fletor transversal positivo.

De acordo com Johnson (2004), este momento fletor transversal, M_{trans} , existente na largura a_m , pode ser obtido a partir da seguinte expressão simplificada:

- Carga concentrada, Q_{Ed} :

$$M_{trans} = \frac{Q_{Ed} (b_{em} - b_m)}{8} \quad (3.18)$$

O momento transversal por unidade de comprimento, m_{trans} , é:

$$m_{trans} = \frac{Q_{Ed} (b_{em} - b_m)}{8a_m} \quad (3.19)$$

Como a chapa colaborante não tem resistência à tração na direção transversal às nervuras, devido a estas poderem abrir, é necessário colocar uma armadura de reforço transversal. O momento fletor resistente m_{Rd} , por unidade de comprimento, da camada de betão acima da chapa colaborante e respetivas armaduras transversais deve verificar a seguinte condição de resistência:

$$m_{trans} \leq m_{Rd} \quad (3.20)$$

A EN1994-1-1 indica que pode ser utilizada, sem cálculo, uma armadura nominal se o valor característico das cargas impostas não exceder os seguintes valores:

- Se tem carga concentrada pontual: 7,5 kN;
- Se tem carga distribuída: 5,0 kN/m². Esta armadura tem como função, reforçar a laje na direção transversal, visto que esta não resiste à tração nessa direção. Caso os valores característicos das cargas impostas exceder os limites acima indicados, a armadura terá de ser determinada de acordo com a EN 1992-1-1. A secção transversal da armadura transversal nominal, segundo a EN 1994-1-1, não deve ser inferior a 0.2% da área de betão estrutural acima das nervuras, e deve estender-se por uma largura não inferior a b_{em} .

3.3.2. Resistência da secção

3.3.2.1. Verificação da segurança aos estados limites últimos

Em relação aos estados limites últimos, dever-se-á utilizar, para a análise global da laje mista uma análise elástica linear (EN 1994-1-1, 2004). É importante fazer uma análise da flexão da chapa depois do betão endurecer para o cálculo da flexão total do piso em serviço. As cargas aplicadas durante a construção bem como as sobrecargas de aplicação não estão presentes nesta verificação, o que leva a que a flexão determinada seja apenas devido a cargas permanentes. Os valores de φ para os estados limites de serviço dados na tabela A.1 do EN 1991-1-6 não são necessários.

Para os estados limites relevantes à segurança estrutural da laje mista, os valores de cálculo das forças internas E_d , não devem exceder os valores de cálculo resistentes, R_d .

A resistência de uma laje mista deve ser assegurada de forma a suportar as ações de cálculo e assegurar que nenhum dos modos de rotura anteriormente mencionados seja atingido. Deste modo, verificação da segurança de lajes mistas devem ser considerados os seguintes estados limites últimos:

- Estado limite último de Flexão;

- Estado limite último de Esforço Transverso;
- Estado limite último de Corte longitudinal;
- Estado limite último de Punçoamento.

As secções críticas a considerar no dimensionamento de lajes mistas são as seguintes:

- Secção *I*: Resistência ao momento positivo ($M_{Rd}^{(+)}$): a secção pode ser estar condicionada se houver uma conexão completa na interface entre o betão e a chapa, onde é conseguida normalmente por amarrações na extremidade ou por uma elevada relação entre o comprimento de corte e a altura útil, L_s / d_p .
- Secção *II*: Resistência ao momento negativo ($M_{Rd}^{(-)}$).
- Secção *III*: Resistência ao Esforço Transverso ($V_{v,Rd}$): a secção pode estar condicionada no caso de lajes espessas e de vão reduzido, ou seja, com uma relação comprimento de corte e a altura útil pequena, L_s / d_p , sujeita a cargas elevadas.
- Secção *IV*: Resistência ao Corte Longitudinal ($V_{l,Rd}$): este é o estado limite que mais condiciona a secção da laje. A carga máxima da laje é determinada pela resistência da interface ao corte longitudinal.
- Secção *V*: Resistência ao Punçoamento ($V_{l,Rd}$).

3.3.2.2. Estado limite último de Flexão

A norma EN 1994-1-1 indica que a resistência à flexão de uma laje mista deve ser determinada através de uma análise elasto-plástica. A verificação da segurança em relação ao estado limite último de flexão deve ser realizado de acordo com a seguinte expressão:

$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} \quad (3.21)$$

em que:

M_{Ed} momento atuante;

$M_{pl,Rd}$ momento fletor resistente plástico.

Para a determinação do momento plástico resistente, $M_{pl,Rd}$, de uma laje mista utilizando chapa colaborante, geralmente é considerado as seguintes hipóteses de acordo com a EN 1994-1:

- É considerada a interação total entre o betão, chapa colaborante e as armaduras;

- A secção de betão resiste a uma tensão de rotura à compressão de 0,85 do valor de cálculo da tensão de rotura à compressão betão, $0,85 f_{cd}$. Este valor é constante em toda a secção transversal, desde o eixo neutro plástico e a fibra mais comprimida do betão;
- As armaduras longitudinais resistem a uma tensão de cedência igual ao valor de cálculo da tensão de cedência do aço das armaduras, f_{sd} , de tração e compressão. Na cláusula 5.1.1 (5) da EN1994-1-1, é indicado que as armaduras deverão ser de Classe B ou C, sendo que, se forem de Classe C, o artigo 9.4.2 (4), não é necessária a verificação da capacidade de rotação da secção;

Na EN 1994-1-1 está referida a abordagem de cálculo para a determinação da capacidade resistente à flexão após o endurecimento do betão, quer para momentos flectores positivos quer para momentos flectores negativos. Para o cálculo do momento fletor positivo, devem ser consideradas duas situações para o eixo neutro plástico, LN_{pl} . Estas situações referem-se ao eixo neutro por cima da chapa colaborante ou ao eixo neutro intercetando a chapa colaborante. A estas situações correspondem diferentes expressões para o valor quantificado do momento resistente plástico, $M_{pl,Rd}$. Para o momento fletor negativo, a posição do eixo neutro localiza-se geralmente na chapa colaborante. Nesta situação, segundo a EN 1994-1-1, a contribuição da chapa é normalmente ignorada, por estar à compressão e pela sua contribuição resistente à compressão ser relativamente pequena quando comparada com a contribuição do betão existente nas nervuras.

3.3.3. Momento fletor positivo

Para a situação do momento fletor positivo podem ocorrer duas situações diferentes da posição do eixo neutro plástico, LN_{pl} , a que correspondem a diferentes expressões para determinar o momento fletor plástico, $M_{pl,Rd}$:

- Caso A: LN_{pl} acima da chapa colaborante;
- Caso B: LN_{pl} intercetando a chapa colaborante.

Caso A: LN_{pl} acima da chapa colaborante, $z_{pl} < h_c$

Esta situação ocorre se a força de compressão na zona maciça da laje for superior à força de tração da chapa colaborante $N_{p,pl}$, mais as das armaduras N_s , então o eixo neutro plástico, LN_{pl} , situa-se acima da chapa colaborante, de modo a haver equilíbrio na secção transversal.

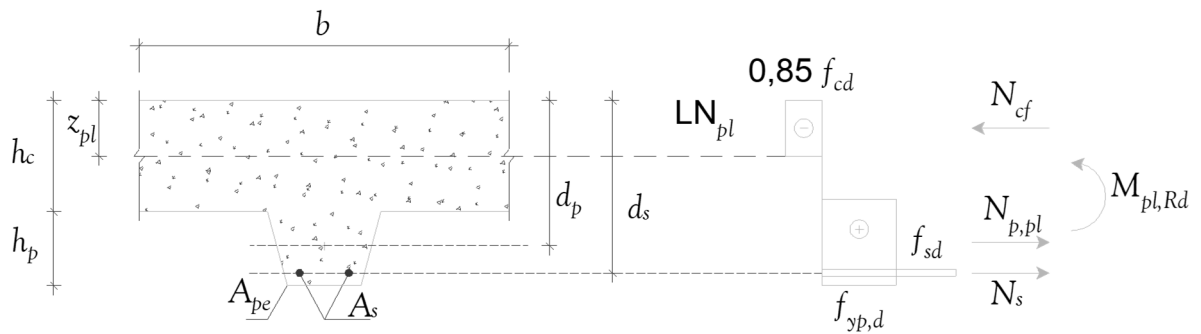


Figura 20 – Distribuição plástica de tensões, quando LN_{pl} se situa por cima da chapa colaborante

De acordo com a Figura 20, a posição do eixo neutro plástico, z_{pl} , e o valor do momento fletor resistente plástico, $M_{pl,Rd}$, podem ser obtidos a partir das seguintes expressões:

$$\sum F_H = 0 \Leftrightarrow z_{pl} b 0,85 f_{cd} = N_{p,pl} + N_s \Rightarrow z_{pl} = \frac{N_{p,pl} + N_s}{b 0,85 f_{cd}} \quad (3.22)$$

$$M_{pl,Rd} = N_{p,pl} \left(d_p - \frac{z_{pl}}{2} \right) + N_s \left(d_s - \frac{z_{pl}}{2} \right) \quad (3.23)$$

em que:

$$N_{p,pl} = A_{pe} f_{yp,d} \quad \text{força de plastificação da secção efetiva da chapa } A_{pe} ;$$

$$N_s = A_s f_{sd} \quad \text{Força de tração na armadura } A_s.$$

Caso B: LN_{pL} **intercetando a chapa colaborante**, $z_{pl} \geq h_c$

Se a força de compressão na zona maciça da laje for menor que a força de tração da chapa colaborante $N_{p,pl}$, mais as das armaduras N_s , então o eixo neutro plástico, LN_{pL} , interseta a secção da chapa colaborante. Neste caso, o eixo neutro plástico, z_{pl} , é determinado utilizando a iteração, visto que é função da área do betão à compressão, A_c , da área da chapa colaborante à compressão, $A_{p,c}$, e da área da chapa à tração $A_{p,t}$. A posição do eixo neutro plástico, z_{pl} , é determinada pela seguinte expressão:

$$z_{pl} \rightarrow -(N_{cf} + N_{p,c}) + (N_s + N_{p,t}) = 0 \quad (3.24)$$

em que:

$$N_{p,c} = A_{p,c} f_{yp,d} \quad \text{força de plastificação da secção efetiva da chapa à compressão;}$$

$$N_{p,t} = A_{p,t} f_{yp,d} \quad \text{força de plastificação da secção efetiva da chapa à tração;}$$

$$N_{cf} = 0,85 f_{cd} A_c \quad \text{força de compressão do betão;}$$

$$N_s = A_s f_{sd} \quad \text{força de tração na armadura } A_s.$$

e o valor do momento fletor resistente plástico,

$$M_{pl,Rd} = (N_s d_s + N_{p,t} z_{p,t}) - (N_{cf} z_c + N_{p,c} z_{p,c}) \quad (3.25)$$

Para simplificar a determinação da posição da linha neutra, poderá ser desprezado o betão à compressão na zona das nervuras bem como a armadura aí colocada. Assim a distribuição de tensões será a seguinte:

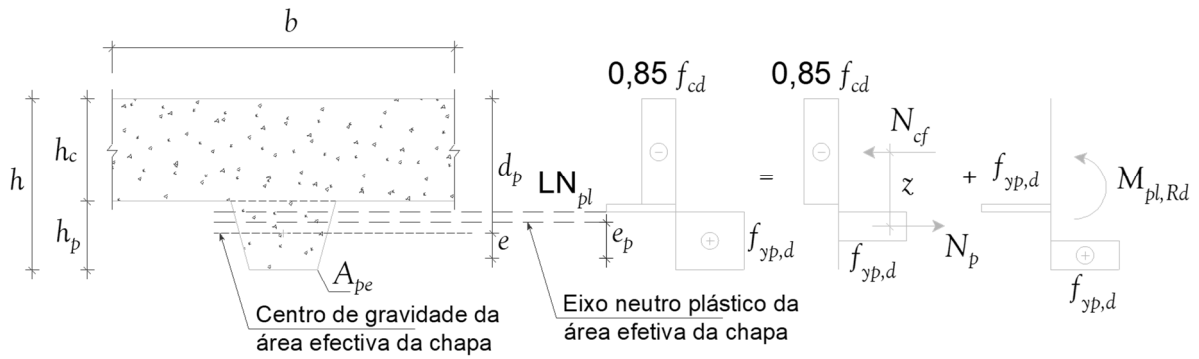


Figura 21 – Distribuição plástica simplificada de tensões, quando LN_{pl} interceta a chapa colaborante

De forma a simplificar a determinação do momento fletor plástico da laje mista (ver Figura 21), o diagrama de flexão composta plástica ($M + N$) da chapa colaborante do aço, pode ser decomposto num diagrama de esforço normal, N_p , centrado no eixo neutro plástico da área efetiva da chapa, e num outro de flexão, M_{pr} , permitindo utilizar a expressão de aproximação à iteração composta da cláusula 9.7.2 (6) EN 1994-1-1, conhecendo-se a posição do centro de gravidade da área efetiva da chapa, e e a posição do eixo neutro plástico, e_p .

Para que a laje mista esteja em equilíbrio, o esforço normal da chapa, N_p , deve ser igual à força de compressão instalada na lamina de compressão, N_{cf} :

$$N_p = N_{cf} = 0,85 f_{cd} h_c b \quad (3.26)$$

Devido ao facto de a chapa estar sujeita a um esforço normal N_p , e haver uma interação entre o momento fletor resistente plástico da chapa, M_{pa} , este irá sofrer uma diminuição. A curva de interação entre N_{cf} e M_{pr} depende da geometria da chapa e simultaneamente da força de plastificação da área efetiva da chapa N_{pa} , e do momento fletor resistente plástico da chapa, M_{pa} :

$$N_{pa} = N_{p,pl} = A_{pe} f_{yp,d} \quad (3.27)$$

$$M_{pa} = W_{pe,pl} f_{yd,p} \quad (3.28)$$

em que:

$W_{pe,pl}$ módulo de flexão plástica da área efetiva da chapa.

A relação entre M_{pr} / M_{pa} e N_{cf} / N_{pa} pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$M_{pr} = 1,25 M_{pa} \left(1 - \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa} \quad (3.29)$$

O momento fletor resistente plástico, $M_{pl,Rd}$, pode ser determinado pela expressão seguinte:

$$M_{pl,Rd} = N_{cf} z + M_{pr} \quad (3.30)$$

em que,

z é o braço entre a força de compressão do betão e a força de tração na chapa de aço.

O valor do braço z , poderá ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$z = h - \frac{h_c}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{N_{cf}}{N_{pa}} \quad (3.31)$$

Caso toda a chapa colaborante se encontre à tração, o valor do braço z , representa a distância do centro de gravidade da área efetiva da chapa e o centro de gravidade da lâmina de compressão do betão, e o seu valor pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$z = h - \frac{h_c}{2} - e \quad (3.32)$$

3.3.4. Momento fletor negativo

Para a determinação do valor de cálculo da resistência ao momento fletor positivo poderá ser desprezado a área da chapa à compressão, já que a sua contribuição para o momento resistente é reduzida quando comparada com a contribuição do betão existente nas nervuras, bem como a resistência do betão à tração. Para este caso, a posição do eixo neutro plástico, z_{pl} , encontra-se geralmente na chapa colaborante, como ilustra a Figura 22.

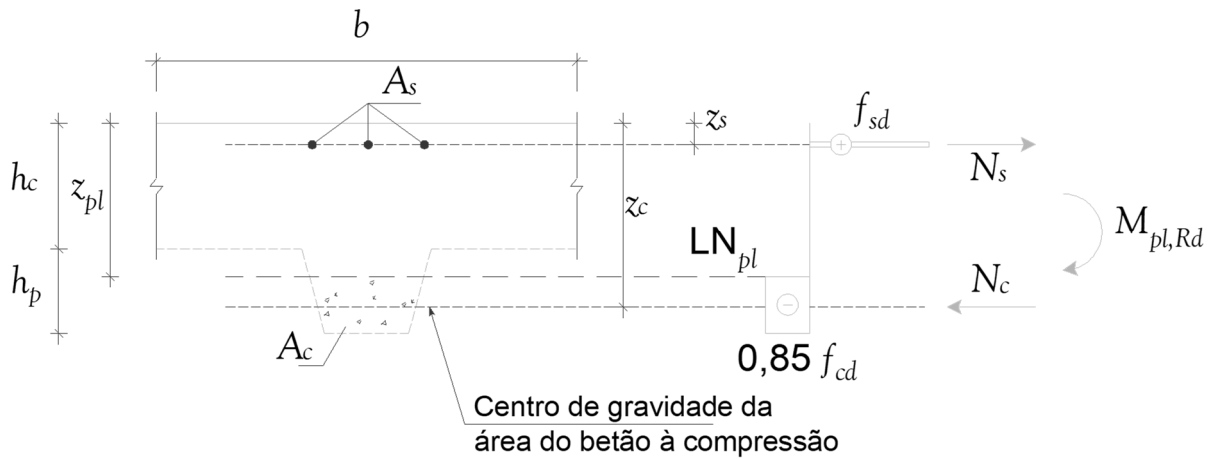


Figura 22 – Distribuição plástica de tensões para momento fletor negativo

A posição do eixo neutro plástico z_{pl} , é determinada iterativamente, até que seja verificada a seguinte expressão de equilíbrio:

$$z_{pl} \rightarrow -N_c + N_s = 0 \quad (3.33)$$

em que:

$$N_c = 0,85 f_{cd} A_c \quad \text{força de compressão no betão situado na nervura;}$$

$$N_s = A_s f_{sd} \quad \text{força de tração na armadura } A_s.$$

O momento fletor resistente plástico pode ser obtido pela expressão:

$$M_{pl,Rd} = N_c z_c - N_s z_s \quad (3.34)$$

De forma a simplificar o cálculo da posição do eixo neutro plástico e assim evitar o carácter iterativo, pode-se considerar que a nervura tem uma largura média, b_0 , (EN 1994-1-1, 2004), de acordo com a figura seguinte:

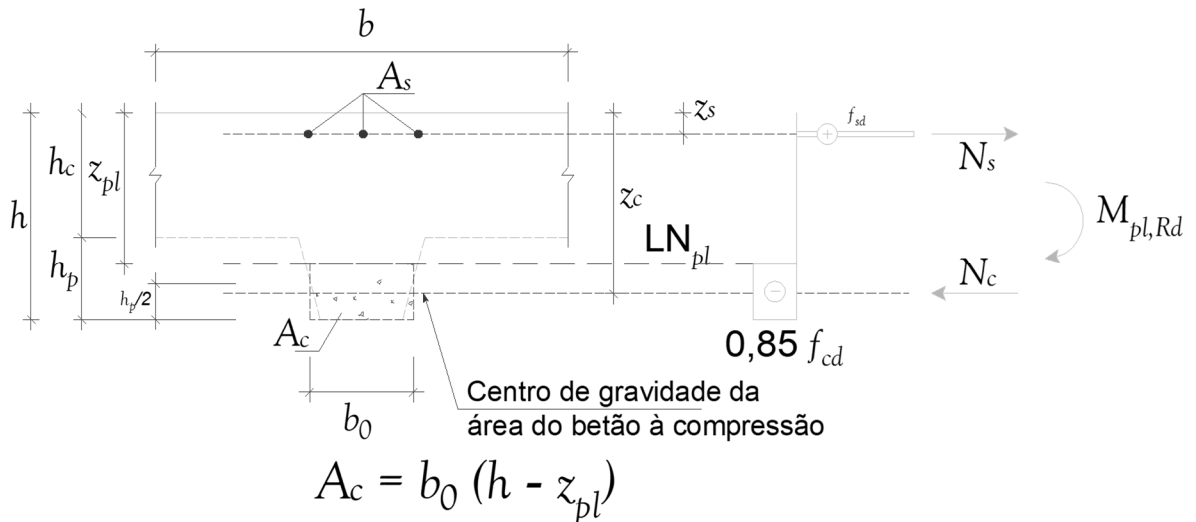


Figura 23 – Distribuição plástica de tensões para momento fletor negativo considerando a nervura com a largura média b_0

Assim, a posição do eixo neutro plástico é determinada pela seguinte expressão de equilíbrio:

$$0,85 f_{cd} b_0 (h - z_{pl}) = A_s f_{sd} \Leftrightarrow z_{pl} = h - \frac{A_s f_{sd}}{0,85 f_{cd} b_0} \quad (3.35)$$

Desta forma, o momento fletor resistente plástico $M_{pl,Rd}$, é obtido através da expressão:

$$M_{pl,Rd} = A_s f_{sd} (z_{pl} - z_s) \quad (3.36)$$

3.3.4.1. Estado limite último de Esforço Transverso

O valor de cálculo da capacidade resistente de uma laje mista ao esforço transverso pode ser obtido através das especificações do Eurocódigo 2. Esta resistência depende da espessura efetiva da secção, onde a chapa colaborante é o elemento de reforço e considerando a ausência de armaduras específicas de esforço transverso. Como tal, a expressão do cálculo da resistência é dada por:

$$V_{v,Rd} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \right] \geq v_{\min} \cdot b_w \cdot d \quad (3.37)$$

onde:

- $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$;
- $v_{min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$;
- $\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d}$;
- d é a altura útil da armadura de tração [mm];
- A_{sl} é a área de armadura na zona tracionada;
- b_w é o somatório das larguras das nervuras.

3.3.4.2. Estado limite último de Corte Longitudinal

Este modo de colapso surge devido a uma força de escorregamento excessiva entre o betão e a chapa colaborante. A verificação ao corte longitudinal fundamenta-se segundo alguns regulamentos Europeus (Calado e Santos, 2010), como a EN 1994-1-1, BS 5950-4, e o Regulamento Americano ANSI/ASCE 3-91 (ASCI 3-91, 1992), e em testes realizados em lajes mistas.

A qualidade mecânica interna da laje mista poderá ser prejudicada pelas pequenas deformações da chapa, de modo que as tolerâncias devem ser mantidas durante o fabrico. Os métodos geralmente utilizados para garantir com que haja uma total ligação de forças longitudinais provocadas pela chapa colaborante e o betão, por vezes não são suficientes. Nestes casos, estas forças poderão ser incrementadas através de fixadores nas extremidades de cada chapa colaborante, como está definido na norma EN 1994-1-1.

A EN 1994-1-1 indica duas situações para a determinação do valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal:

- Corte longitudinal em lajes mistas sem amarração de extremidade;
- Corte longitudinal em lajes mistas com amarração de extremidade.

Nesta verificação será demonstrado que o valor de cálculo do esforço transverso máximo, V_{Ed} , para uma largura b da laje, não deve exceder o valor de cálculo da força resistente ao corte longitudinal, $V_{l,Rd}$.

$$V_{Ed} \leq V_{l,Rd} \quad (3.38)$$

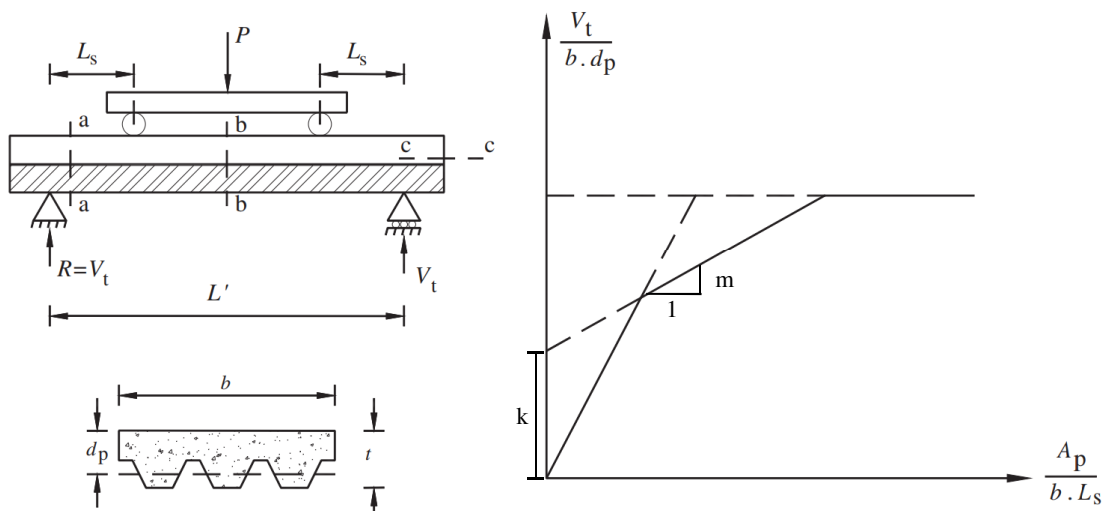


Figura 24 – Relação entre o modo de colapso e o vão da laje (EN 1994-1-1, 2004)

Este valor, é determinado a partir do método $m-k$ ou do método da conexão parcial. Este método só poderá ser utilizado em lajes mistas com comportamento dúctil em relação ao corte longitudinal.

O método $m-k$ baseia-se em ensaios experimentais em lajes mistas simplesmente apoiadas com duas cargas lineares aplicadas. O Anexo B.3 da EN 1994-1-1 não considera a força de atrito, τ_u , entre a chapa colaborante e o betão, mas o esforço transversal da laje para a determinação de corte longitudinal no vão de corte L_s .

Este método não apresenta nenhuma alteração na expressão da força resistente ao corte longitudinal se a laje apresentar um comportamento frágil ou dúctil. O método não impede a utilização como valor característico um valor de 10% do valor mínimo do grupo dos ensaios efetuados, sendo que, a EN 1994-1-1 acrescenta ainda um coeficiente parcial de segurança γ_s igual a 1,25, representando um coeficiente de redução de 0,80 para ter em

consideração o comportamento frágil da conexão dos materiais. O método não considera o efeito favorável que as amarrações na extremidade da laje têm para o valor da força resistente ao corte longitudinal, já que todos os ensaios são realizados sem quaisquer amarrações na laje. Se a força resistente ao corte longitudinal for insuficiente para verificar este tipo de rotura, esta poderá ser aumentada com a utilização de amarrações nas extremidades da laje utilizando conetores.

Devido ao facto de ser mais fácil a determinação da relação entre a força do corte longitudinal e a força do corte vertical em fase elástica, o método *m-k* que permite relacionar as duas forças em fase elasto-plástica:

$$V_{l,Rd} = b d_p \left(m \frac{A_p}{b L_s} + k \right) \frac{1}{\gamma_{vs}} \quad (3.39)$$

em que:

- b largura e altura média da laje (mm);
- d_p distância entre o centro geométrico da chapa colaborante e a fibra comprimida mais afastada;
- A_p área da chapa colaborante;
- m fator empírico para cálculo da resistência ao corte, obtido através de ensaios experimentais e fornecidos pelo fabricante;
- k fator empírico para cálculo da resistência ao corte, obtido através de ensaios experimentais e fornecidos pelo fabricante;
- L_s vão de corte (mm);
- γ_{vs} coeficiente parcial de segurança relativo à conexão, valor recomendado 1,25.

O vão de corte L_s , depende do tipo de carregamento e das condições de apoio. A EN 1994-1-1, sugere diferentes valores para este parâmetro de acordo com as condições de apoio, indicados na Tabela 4:

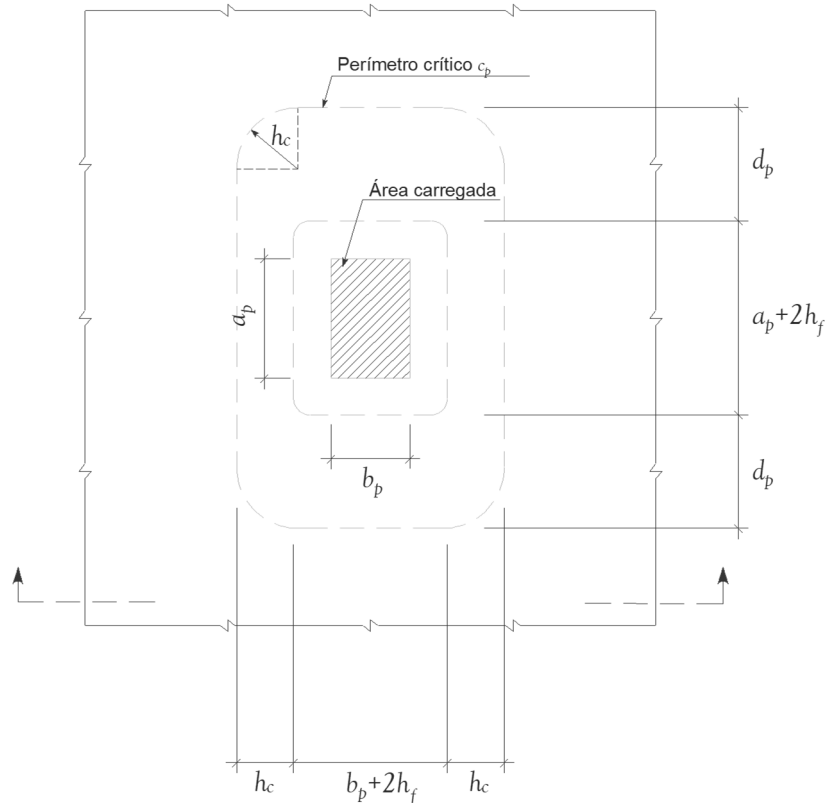
Tabela 4 – Valores para L_s

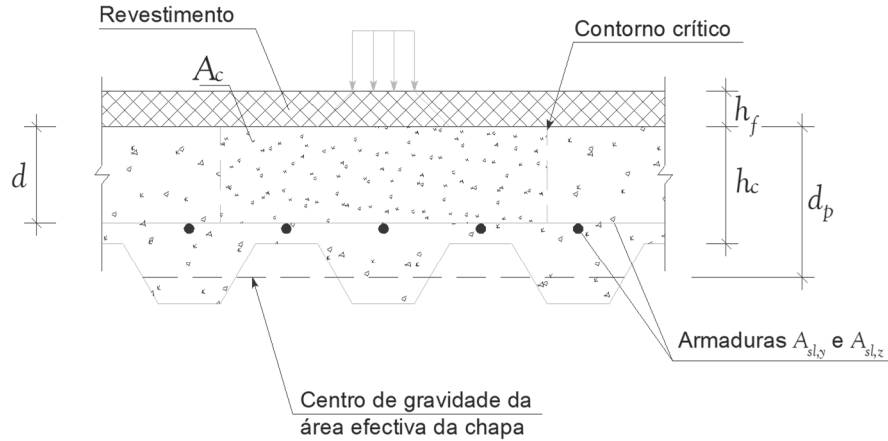
Laje mista			
L_s	Simplemente apoiada	Laje contínua	
	$L/4$	vãos intermédios	vãos de extremidade
		0,8L	0,9L

3.3.4.3. Estado limite último de Punçoamento

À semelhança das lajes de betão armado, também a laje mista, quando submetida a cargas concentradas elevadas, pode sofrer uma rotura por punçoamento. É considerado que a rotura ocorre segundo um perímetro de contorno crítico, C_p de cantos arredondados. Este perímetro de contorno (ver Figura 25), baseia-se na dispersão de 45° do centro de gravidade da chapa de aço na direção paralela das reentrâncias na parte superior da chapa e da zona menos rígida na direção transversal. Assim, C_p é calculado com a seguinte expressão:

$$C_p = 2\pi h_c + 2(2d_p + a_p + b_p - 2h_c) + 8h_f \quad (3.40)$$





Secção A - A

Figura 25 – Definição do perímetro do contorno crítico para o punçoamento de uma laje mista

A EN 1994-1-1 indica que se deve colocar uma armadura de reforço longitudinal e transversal ao longo da espessura h_c de betão. As percentagens de armadura de reforço na direção longitudinal (X) e transversal (Y) são dadas pela seguinte expressão:

$$\rho_x = \frac{A_{s,x}}{h_c} \quad (3.41)$$

$$\rho_y = \frac{A_{s,y}}{h_c} \quad (3.42)$$

A resistência ao punçoamento bem como a percentagem de armadura efetiva, determinam-se através das seguintes expressões:

$$V_{p,Rd} = \frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} C_p \times h_c \geq V_{p,Rd}^{\min} \quad (3.43)$$

$$\rho = (\rho_x \rho_y)^{1/2} \leq 0,02 \quad (3.44)$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0, \text{ com } d \text{ em } mm \quad (3.45)$$

$$V_{p,Rd}^{\min} = 0,035 k^2 f_{ck}^{3/2} C_p \times h_c \quad (3.46)$$

em que:

f_{ck} tensão característica de compressão, em provetes cilíndricos, em N/mm²;

d altura média entre os eixos dos varões de reforço nas duas direções e a fibra mais extrema do betão à compressão.

3.3.5. Estados limites de serviço

De forma a garantir a durabilidade de uma laje mista, deve ser feita a verificação aos estados limites de serviço. Desta forma, esta verificação deve incluir sobre o controlo da:

- Fendilhação do betão;
- Deformação;
- Vibração.

3.3.5.1. Fendilhação

A largura das fendas nas regiões de momentos negativos em lajes contínuas deve ser verificada de acordo com a EN 1992-1-1.

Poderá haver a formação de fissuras sem qualquer tentativa de controlar a sua largura, desde que não ponha em causa o funcionamento da estrutura.

De um modo geral, as lajes mistas por serem contínuas, podem ser analisadas como uma sucessão de tramos simplesmente apoiados como refere a EN 1994-1-1, de forma a simplificar a metodologia de cálculo. Deste modo, deve ser colocada uma armadura de fendilhação sobre as nervuras, na zona dos apoios intermédios. Essa armadura, no caso de uma construção não escorada, não deverá exceder 0,2% da área de secção de betão situada acima das nervuras, e 0,4% da área da mesma secção caso seja uma construção com escoramentos. Esta armadura deverá ser colocada num comprimento igual a $0,25L$ de cada lado do apoio interno, em que L é o comprimento do vão a considerar.

A quantidade mínima de armadura colocada na laje pode não garantir que a largura das fendas seja inferior a 0,3 mm. De outra forma, caso se pretenda controlar a largura das

fendas, então as lajes mistas deverão ser analisadas como contínuas, devendo a fendilhação ser verificada de acordo com a EN 1992-1-1.

3.3.5.2. Deformação

Na EN 1994-1-1, a cláusula 9.8.2 (1) refere-se à EN 1990, como os requisitos básicos à verificação da deformação da estrutura. As deformações verticais devem ser calculadas utilizando as combinações de ações apropriadas à solicitação da estrutura. No caso das lajes mistas, há que considerar as seguintes situações:

- Deformação das chapas colaborantes utilizadas como cofragem;
- Deformação da laje em fase mista.

Para a fase de construção, o Eurocódigo 4 indica que a verificação das deformações devidas a cargas unicamente aplicadas à chapa colaborante, deve ser realizada de acordo com o Eurocódigo 3-parte 3 e em concordância com a teoria da elasticidade.

Devido à colocação do betão fresco sob a chapa colaborante, a deformação desta torna-se irreversível, sendo usado para a quantificação das ações a combinação característica, já que corresponde a um estado limite irreversível.

As deformações devido às cargas aplicadas já na fase mista, deverão ser determinadas através de uma análise elástica global, desprezando os efeitos de retração do betão. De um modo geral, não é considerada a deformação da laje mista devido à torção dos apoios.

A deformação de ambas as fases, é calculada pela seguinte equação:

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{wL^4}{E_a I} \quad (3.47)$$

em que:

w carga aplicada, em kN/m²;

L vão entre apoios, em mm;

E_a módulo de elasticidade, em MPa;

I segundo momento de inércia do elemento, em mm⁴.

Para um tramo intermédio de uma laje mista contínua onde a interligação entre o betão e a chapa é garantida por interligação mecânica e/ou interligação de encaixe devido às reentrâncias da chapa, a flecha poderá ser calculada considerando as seguintes aproximações (EN 1994-1-1):

- O momento de inércia poderá ser determinado a partir dos valores médios relativos à secção fendilhada e à secção não fendilhada;
- Para o betão, poderá utilizar-se um valor médio para o coeficiente de homogeneização para os efeitos a longo e a curto prazo, utilizando a seguinte expressão, (EN 1994-1-1, 2004)

$$n = 2E_a / E_{cm} \quad (3.48)$$

O momento de inércia de uma laje mista, I_{eq} , é dado pelo valor médio dos valores relativos à secção não fendilhada e à secção fendilhada:

$$I_{eq} = \frac{I_{eq,1} + I_{eq,2}}{2} \quad (3.49)$$

O valor do momento de inércia para a secção não fendilhada, $I_{eq,1}$, e secção fendilhada, $I_{eq,2}$, poderá ter determinada através das seguintes expressões:

- Secção não fendilhada:

$$I_{eq,1} = \frac{bh_c^3}{12n} + \frac{bh_c}{n} \left(z_e - \frac{h_c}{2} \right)^2 + \frac{b_0 h_p^3}{12n} + \frac{b_0 h_p}{n} \left(h - z_e - \frac{h_p}{2} \right)^2 + A_{pe} (d_p - z_e)^2 + I_p \quad (3.50)$$

$$z_e = \frac{\frac{bh_c^2}{2} + b_0 h_p d_p + n A_{pe} d_p}{bh_c + b_0 h_p + n A_{pe}} \quad (3.51)$$

em que:

n valor médio do coeficiente de homogeneização;

z_e posição do eixo neutro elástico, em mm;

A_{pe} área efetiva da chapa colaborante, em mm^2 ;

I_p momento de inércia da chapa colaborante, em mm^4 ;

b_0 largura média da nervura, em mm.

- Secção fendilhada, $z_e < h_c$

$$I_{eq,2} = \frac{bz_e^3}{3n} + I_p + A_{pe}(d_p - z_e)^2 \quad (3.52)$$

$$z_e = \frac{nA_{pe}}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2bd_p}{nA_{pe}}} - 1 \right) \quad (3.53)$$

Para o cálculo da flecha a meio vão, pode-se considerar que a laje mista é simplesmente apoiada, desprezando geralmente os momentos nos apoios.

No caso de não ser conhecido a partir de ensaios experimentais com ancoragens finais a influência da conexão entre a chapa colaborante e o betão, deverá ser feita uma análise simplificada, utilizando o modelo de arco à tração. A partir deste modelo, representado na Figura 26, a flecha a meio-vão, δ , pode ser determinada com base no alongamento do tirante, e_t e no encurtamento do arco e_c .

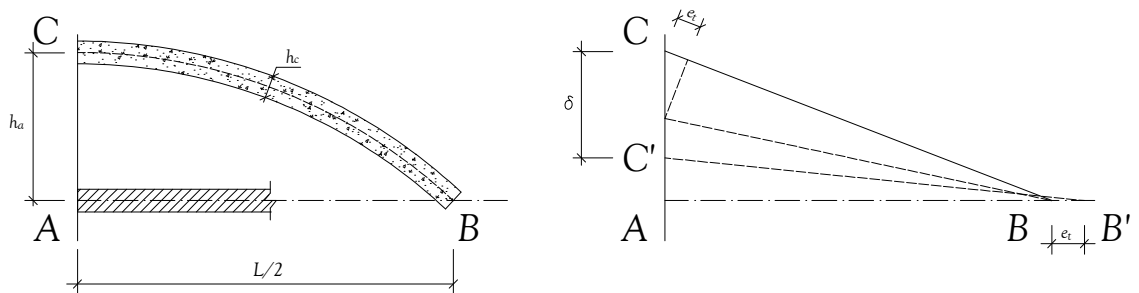


Figura 26 – Modelo de arco e tirante para a determinação da flecha a meio-vão de lajes mistas com amarração na extremidade (Calado & Santos, 2010)

A distância entre o tirante e o arco a meio vão é representado por h_a . Devido à existência de força de tração na chapa colaborante e da força de compressão no betão, estas irão originar a meio vão extensões \mathcal{E}_t e \mathcal{E}_c , respetivamente. O comprimento do arco têm um valor igual

a $L/2$, onde o valor do alongamento do tirante, e_t , e o encurtamento do arco, e_c , podem ser determinados a partir das expressões:

$$e_t = \varepsilon_t \frac{L}{2} \quad (3.54)$$

$$e_c = \varepsilon_c \frac{L}{2} \quad (3.55)$$

O cálculo da flecha a meio vão de uma laje mista pode ser feito a partir da expressão:

$$\delta = (\varepsilon_t + \varepsilon_c) \frac{L^2}{4h_a} \quad (3.56)$$

O cálculo da flecha poderá ser dispensado se as duas condições seguintes forem verificadas:

- A relação entre o vão e a altura útil da laje mista, L/d_p , não ultrapassar os limites indicados na EN 1992-1-1, 7.4, para betão levemente solicitado, $\rho = 0,5\%$;
- A carga de escorregamento inicial, observada nos ensaios e definida como a carga que provoca o escorregamento de extremidade de 0.5 mm, exceder 1,2 vezes o valor de cálculo da carga de serviço.

Os valores da relação entre o vão e a altura útil para lajes mistas, são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 - Valores de L/d_p para lajes mistas sem esforço normal de compressão

Tipo de estrutura	Betão levemente solicitado $\rho = 0,5\%$
Laje simplesmente apoiada	20
Vão extremo de uma laje contínua	26
Vão interior de uma laje contínua	30

O estado limite de deformação pode ser verificado ao limitar a relação vão/altura da laje, de acordo com as fórmulas apresentadas de seguida, caso contrário terá de ser comparada uma flecha calculada com um valor limite, de acordo com a cláusula 7.4.3 da EN 1992-1-1.

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} \right] \text{ se } \rho \leq \rho_0 \quad (3.57)$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \text{ se } \rho > \rho_0 \quad (3.58)$$

em que:

l/d valor limite da relação vão/altura;

K coeficiente que tem em conta os diferentes sistemas estruturais;

ρ_0 taxa de armaduras de referência = $10^{-3} \sqrt{f_{ck}}$;

ρ taxa de armaduras de tração necessária a meio vão (ou no apoio no caso de consolas) para equilibrar o momento devido às ações de cálculo;

ρ' taxa de armaduras de compressão necessária a meio vão (ou no apoio no caso de consolas) para equilibrar o momento devido às ações de cálculo;

f_{ck} em MPa.

3.3.5.3. Vibração

O Eurocódigo 4 (EN 1994-1-1, 2004) especifica que, para o estado limite de serviço de vibração, se devem satisfazer os critérios definidos na EN1990, mais especificamente na secção A1.4.4.

Esta, por sua vez, estabelece que a frequência própria da estrutura ou elemento estrutural deve ser mantida acima de valores apropriados tendo em conta a função a que se destina, podendo ter origem na circulação pedonal, funcionamento de máquinas, tráfego rodoviário entre outras (NP EN 1990, 2009).

Na eventualidade destes efeitos de vibrações provocarem fadiga, o (NP EN 1991-1, 2009) especifica que deve ser estabelecido um modelo de ações de fadiga.

4. Programa Experimental

4.1. Introdução

Neste capítulo é descrito o programa experimental realizado no LEBA da ESTG do Politécnico de Leiria. Foram executadas e ensaiadas 8 lajes mistas com o objetivo de avaliar o seu comportamento até à rotura. Outro dos objetivos foi determinar os parâmetros m e k para a chapa colaborante BC 70 da empresa *Blocotelha*, parâmetros utilizados nas expressões regulamentares para avaliação do corte longitudinal.

Os resultados dos ensaios permitiram determinar a carga de rotura, o modo de rotura, a flecha máxima a meio vão e o escorregamento na interface aço / betão sob a carga aplicada.

4.2. Planeamento dos ensaios e geometria dos modelos

Inicialmente realizou-se um estudo individualizado de todos os materiais que seriam utilizados na produção das lajes mistas.

Numa primeira fase foi estudado o esquema de ensaio a adotar tendo em conta os modelos utilizados as prescrições das normas europeias (Anexo B.3 da EN 1994-1-1).

Para atingir estes objetivos, foram fabricadas 8 lajes mistas com comprimento de 2.5 m e largura de 1.0 m, tendo-se considerado lajes de duas espessuras, 4 lajes com altura total (h_t) de 130 mm e as 4 restantes com altura de 150 mm. Na Figura 27 são representados os modelos utilizados nos ensaios.

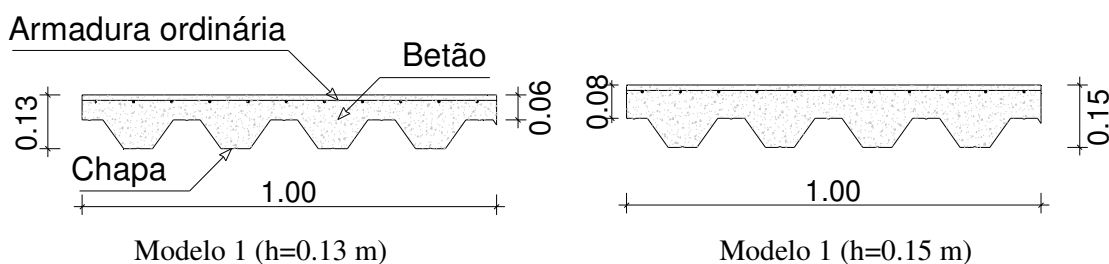


Figura 27 – Geometria dos modelos

Na Tabela 6 são apresentadas as características dos modelos adotados.

Tabela 6 – Características dos modelos adotados

Ensaio	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Armadura de distribuição
LC 1.1	2500	1000	130	# Ø6//0.20
LC 1.2	2500	1000	130	
LC 1.3	2500	1000	130	
LC 1.4	2500	1000	130	
LC 2.1	2500	1000	150	
LC 2.2	2500	1000	150	
LC 2.3	2500	1000	150	
LC 2.4	2500	1000	150	

4.3. Materiais

Nesta secção apresentam-se todos os materiais utilizados na parte experimental do presente estudo, bem como os ensaios realizados para a sua caracterização.

4.3.1. Chapa de aço colaborante

Foi adotada para todos os modelos uma chapa colaborante com a geometria indicada na Figura 28.



Figura 28 – Geometria da chapa colaborante (em milímetros)

Na Tabela 7 são apresentadas as principais características da chapa colaborante utilizada no fabrico das lajes.

Tabela 7 - Propriedades geométricas e mecânicas do perfil BC 70

Espessura [mm]	Peso [Kg/m ²]	i_{eff} [cm]	A_{eff} [cm ²]	I_{eff} [cm ⁴]	W_{eff} [cm ³]	M_{Rd} [kNm/m]
0,70	7,82	2,81	5,80	59,64	17,31	4,85
		Raio de giração efetivo	Área efetiva	Inércia;	Módulo de flexão efetivo	Momento fletor resistente

i_{eff} – raio de giração efetivo

W_{eff} – módulo de flexão efetivo

A_{eff} – área efetiva

M_{Rd} – momento fletor resistente

I_{eff} – inércia

4.3.2. Betão leve

Para o fabrico do betão para as lajes, pretendia-se um betão com uma classe de resistência adequada de forma a ser possível utilizar em casos reais. Deste modo, foi adotada uma composição corrente para o betão leve que corresponde às exigências pretendidas, com a composição apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição do betão leve adotado (LC 25/28)

Constituintes	Massas [Kg/m ³]	Volume [litros/m ³]
Cem II-A/L 42.5	350	113
GSky 526 (Adj)	2,1	2
Água	190	163
Ar	-	25
AF (areia 0/1)	330	125
AM (areia 0/4)	612	233
Leca HD 4/12	416	339

Foram realizados ensaios de resistência à compressão de acordo com a norma EN 12390-3 em cubos normalizados com dimensões de 0,15 x 0,15 x 0,15 m³, estando os resultados dos ensaios apresentados na Tabela 9 e Figura 29.

Tabela 9 – Resistência à compressão do betão LC 25/28

	Peso (g)	Densidade (kg/m³)	Força (kN)	Tensão (MPa)
$f_{cm,48h}$	6014	1780	490,5	21,80
	6064	1800	479,0	21,29
	6185	1830	477,8	21,24
$f_{cm,6d}$	6177	1830	664,6	29,54
	6163	1830	661,2	29,39
	6134	1820	648,5	28,32
$f_{cm,27d}$	5900	1750	719,8	32,00
	6100	1810	720,2	32,00
	6140	1800	677,0	30,00

Através da análise da Figura 29 pode-se constatar um grande desenvolvimento da resistência em idades jovens, maioritariamente devido ao uso de cimento 42,5R. Os resultados obtidos da resistência à compressão vão de encontro ao esperado de um betão LC 25/28.

Os valores de densidade determinados nos ensaios enquadram-se na classe de massa volúmica D1,8 de acordo com a EN 206-1 (NP EN 206-1, 2005).

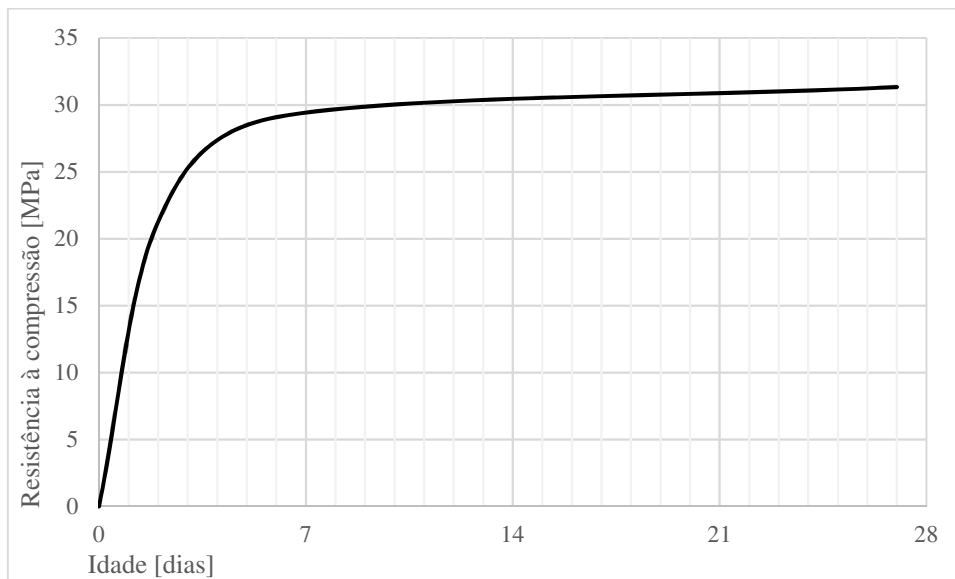


Figura 29 – Desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo

4.3.3. Armaduras ordinárias

Para os ensaios foi utilizado como armadura ordinária uma malha quadrada, 200 x 200 mm², constituída por varões $\phi 6$ da classe resistência A400NR, colocada na face superior da laje com um recobrimento de 2,5 cm para controlo da fendilhação.

4.4. Ensaio

4.4.1. Preparação dos ensaios

As fases de fabrico das lajes são apresentadas na Figura 30 e são descritas nesta secção.

Para o fabrico das lajes mistas começou-se por fabricar as cofragens em madeira com a configuração pretendida. De forma a manter a configuração da laje ao ser betonada, houve a necessidade de introduzir na cofragem ripas de madeira ao longo do vão e na largura, bem como na bordadura, como ilustrado na Figura 30 a) e Figura 30 b). Seguidamente colocou-se a armadura de distribuição com afastamento de 20 cm na longitudinal e 30 cm na transversal (ver Figura 30 c e d). Depois de todos os elementos dos moldes das lajes estarem finalizados, iniciou-se a montagem de todo o layout de forma a receber o betão leve, como ilustra a Figura 30 e) e f). Finalizados todos os modelos das lajes mistas, procedeu-se à colocação do óleo descofrante (ver Figura 30 g).

Finalmente procedeu-se à betonagem, vibração e acabamento da superfície das lajes, como se ilustra na Figura 30 h), i) e j).



a) Cofragem em madeira



b) Ripas de madeira na bordadura e na largura da cofragem



c) Armação da malha de aço



d) Malha de aço anti-fissuração



e) Chapa de aço perfilada colocada na cofragem



f) Modelo finalizado



g) Colocação de óleo descofrante



h) Vibração do betão



i) Alisamento de superfície



j) Modelos betonados

Figura 30 – Fabrico dos modelos

4.4.2. Instrumentação

De modo a recolher toda a informação necessária para caracterizar o comportamento da secção, foi definida uma configuração de distribuição de extensómetros e defletómetros.

A colocação dos 16 extensómetros “Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd” tipo PFL-10-11, foi disposta nas zonas da secção onde estavam previstas as maiores deformações, colando-os de acordo com o esquema da Figura 31.

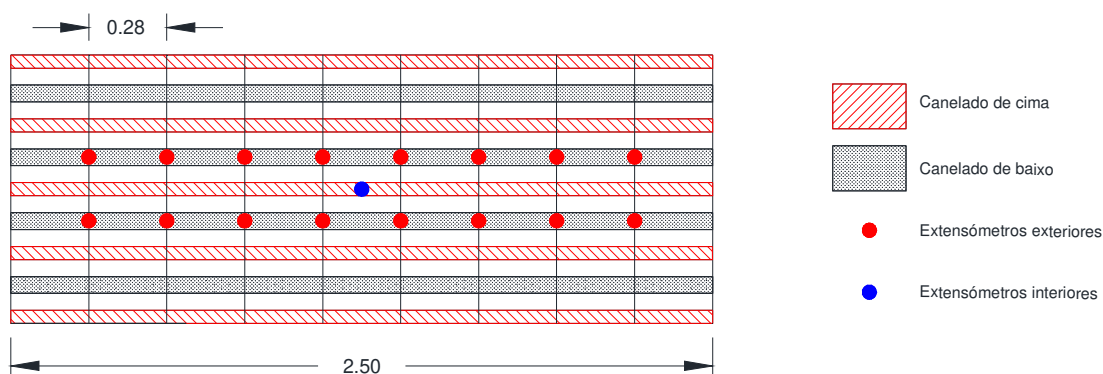
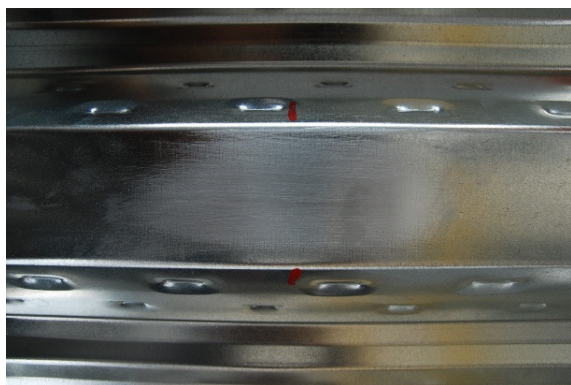


Figura 31 – Esquematização da colocação dos extensómetros nas zonas da secção

As fases da colocação dos extensómetros são apresentadas na Figura 32 e são descritas nesta secção.

Para a colocação individual dos extensómetros foi fundamental retirar toda a camada de revestimento da chapa com recurso a uma lixa manual, de modo a criar uma zona limpa (ver Figura 32 a). De seguida, limpou-se cada zona com acetona para suceder-se à marcação da localização exata de cada extensómetro, como ilustra a Figura 32 b).

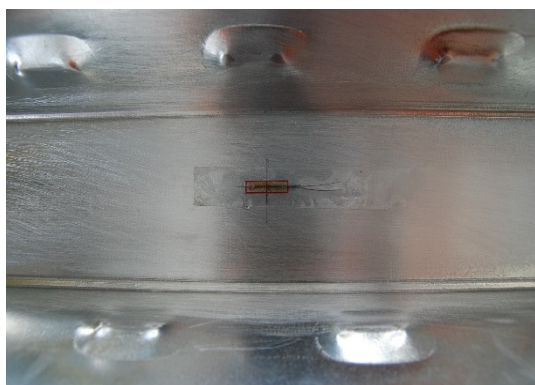
Por último, e após concluída toda a preparação da superfície, colaram-se os extensómetros com uma cola de base cianoacrilato, soldaram-se os fios de ligação de cada um a fios elétricos e por fim protegeu-se com silicone (ver Figura 32 c), d), e) e f).



a) Preparação da superfície



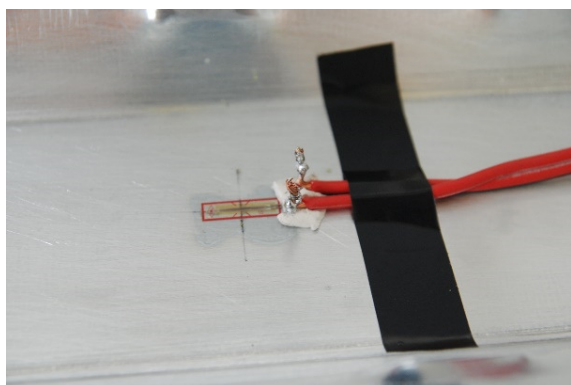
b) Marcação da zona dos extensómetros



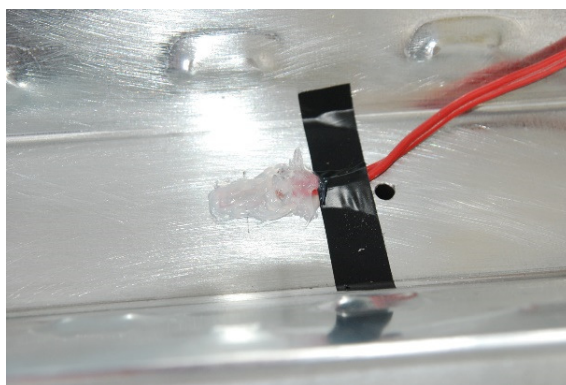
c) Colagem dos extensómetros



d) Processo de soldagem



e) Finalização da colagem



f) Proteção dos extensómetros com silicone

Figura 32 – Instrumentação

4.4.3. Planeamento e execução

Depois de todos os modelos finalizados e o tempo de cura necessário para o betão, deu-se início à montagem dos conjuntos para ensaio.

Conhecendo a carga de rotura da laje foi realizado um ensaio cíclico onde a carga aplicada poderia variar de $0.2 W_t$ a $0.6 W_t$ do teste inicialmente efetuado segundo o EC4.

Começou-se por marcar no chão o local dos apoios de acordo com a posição da carga do pórtico de forma a ficar centrado com o mesmo e evitando excentricidades de carga. Seguidamente foram dispostos os perfis metálicos de apoios nos respetivos locais unidos por um varão roscado de forma a não haver deslocações de apoios, tornando-os fixos. De forma a não travar os deslocamentos da laje, foi ainda colocado um varão redondo CK 45 de 50 mm de diâmetro em cada apoio fixo, criando assim um apoio móvel onde a laje assentava, como mostra a Figura 33.

A configuração para a distribuição de carga foi conseguida através de dois perfis metálicos HEA 100 colocados a um quarto de vão a partir dos apoios, garantindo assim dois pontos de aplicação de carga, (ver Figura 33).

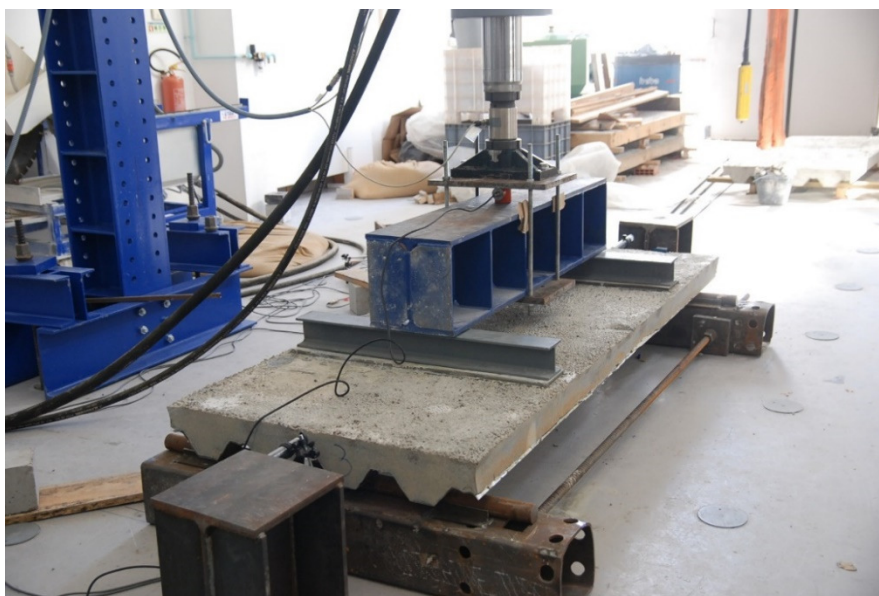
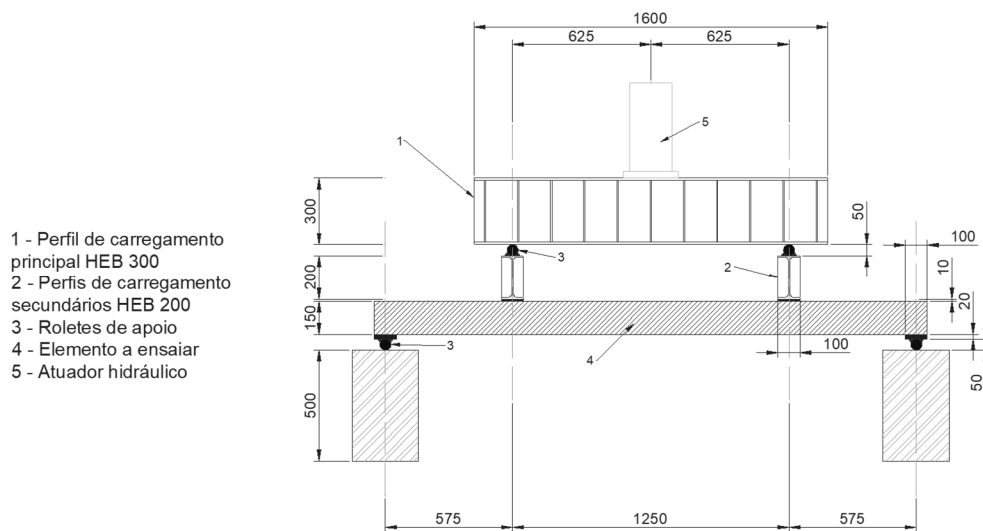


Figura 33 - Layout do ensaio à flexão

Em conformidade com a norma EN 1994-1-1, os ensaios foram realizados em duas fases utilizando dois grupos de ensaios. Inicialmente foram realizados ensaios teste de forma a perceber se todo o layout pretendido funcionava em conformidade para cada tipo de laje utilizada ($h_t=13$ cm e $h_t=15$ cm). Estes ensaios testes permitiram igualmente obter uma estimativa da carga de rotura da laje, W_t , utilizando uma carga estática, adotando uma velocidade de carregamento de 0.25 mm/min através de um atuador hidráulico “Servosis” CH4-100/C300, com um curso de 300 mm e uma capacidade de carga de 1000 kN e uma célula de carga “Servosis” PCI-200 com 2000 kN de capacidade.

5. Análise e discussão dos resultados

Concluídos os trabalhos laboratoriais, neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

Na secção 5.1.1 são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados. Na secção 5.1.2 são discutidos os ensaios instrumentados. Na secção 5.1.3 são demonstrados os modos de rotura verificados em cada ensaio realizado, bem como ilustrada a posição dos danos registados. A secção 5.1.4 apresenta as curvas carga / deslocamento correspondentes para cada ensaio realizado. Na secção 5.2 discutem-se os resultados obtidos e por fim na secção 5.3 é feita uma comparação com outros trabalhos.

5.1. Resultados

5.1.1. Resumo dos resultados obtidos

Na Tabela 10 e na Tabela 11 são apresentados os valores obtidos nos ensaios realizados durante a campanha experimental, bem como a caracterização do tipo de comportamento e rotura verificada.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos

Ensaio	Vão	L (mm)	h_t (mm)	Carga máxima (kN)	M_{Ed} (kN/m ²)	V_{Ed} (kN)	Carga com 0.1 mm de escorregamento (kN)	Carga para $\delta = L/50$ (kN)
LC 1.1	2500	1000	130	25,66	5,00	12,83	20,36	14,43
LC 1.2	2500	1000	130	26,30	5,13	13,15	10,33	17,33
LC 1.3	2500	1000	130	28,96	5,65	14,48	17,63	17,96
LC 1.4	2500	1000	130	28,43	5,55	14,22	20,39	20,56
LC 2.1	2500	1000	150	32,23	6,23	16,05	28,19	29,43
LC 2.2	2500	1000	150	33,22	6,48	16,61	27,59	21,57
LC 2.3	2500	1000	150	37,63	7,33	18,82	29,26	28,86
LC 2.4	2500	1000	150	37,03	7,22	18,52	35,96	31,19

Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos

Ensaio	Escorregamento na carga máxima (mm)	$\delta_{Pm\acute{a}x}$ (mm)	$\sigma_{m\acute{a}x, \text{a}\acute{o}}$ [MPa]	Tipo de comportamento segundo EC4	Tipo de rotura
LC 1.1	1,09	16,83	N/A	Dúctil	Tipo II
LC 1.2	1,67	15,69	N/A	Dúctil	
LC 1.3	0,93	13,23	N/A	Dúctil	
LC 1.4	2,15	25,20	346,5	Dúctil	
LC 2.1	0,27	16,71	N/A	Dúctil	
LC 2.2	0,47	20,34	N/A	Dúctil	
LC 2.3	1,20	26,07	N/A	Dúctil	
LC 2.4	1,21	63,18	196,14	Frágil	

L – vão da laje

δ – flecha

h_t – espessura da laje

$\delta_{Pm\acute{a}x}$ – flecha máxima

M_{Ed} – momento fletor atuante

$\sigma_{m\acute{a}x, \text{a}\acute{o}}$ – tensão máxima no aço

V_{Ed} – esforço transversal

5.1.2. Ensaio instrumentado

Nesta secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios das lajes instrumentadas para $h_t = 15$ cm e $h_t = 13$ cm. A instrumentação das lajes teve como objetivo a verificação do estado de tensão da chapa e a transferência de carga na interface aço-betão.

- **Laje $h_t = 13$ cm (Laje LC 1.4)**

Na Figura 34 é ilustrada a rotura observada no ensaio realizado na laje LC 1.4, laje com $h_t=15$ cm) e o mapeamento da fendilhação.

Observou-se fendilhação no betão com o aparecimento de diversas fissuras entre os pontos de aplicação da carga ao longo do decorrer do ensaio.

É possível observar na Figura 34 que ocorreu uma rotura por corte longitudinal na interface aço / betão. A degradação da transferência de cargas na interface entre os dois materiais causou um deslocamento relativo entre os mesmos, provocando assim o colapso da laje, com um modo de rotura do tipo II.

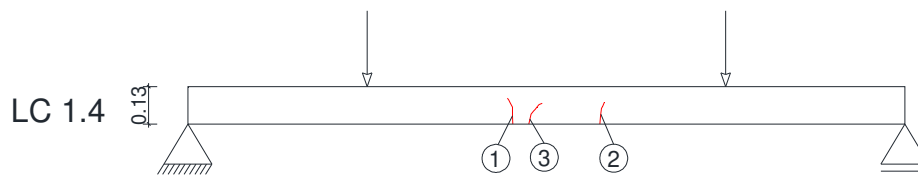


Figura 34 – Ilustração da fissuração e posição relativa das fissuras da laje LC 1.4 ($h_t = 13$ cm)

Na Figura 35 estão representadas as curvas carga / deslocamento e extensão / deslocamento referentes à laje instrumentada LC 1.4 ($h_t = 13$ cm) verificando-se um comportamento dúctil da estrutura.

Relativamente à curva carga / deslocamento, terminada a realização dos ciclos de carga é notório um escorregamento inicial após atingir a carga de aproximadamente 20,0 kN, continuando a haver transmissão de carga entre a chapa e o betão assegurada pelas saliências presentes nas almas da chapa colaborante. A carga volta a subir até à carga máxima de 28,4 kN com uma ligeira diminuição de rigidez comparativamente com o primeiro patamar de carregamento. Depois de atingida a carga máxima há uma diminuição da mesma, mantendo-se estável na ordem dos 20,0 kN até cerca de 80 mm de deslocamento, momento em que verifica a rotura do conjunto.

Analisando a segunda curva presente na mesma figura, curva extensão / deslocamento, é possível verificar que no momento em que há o primeiro escorregamento, há um aumento na sollicitação da chapa a meio vão por perda de adesão e consequente transferência de esforços mecânica na interface, tracionando a chapa colaborante. A partir deste ponto constata-se que o aumento da extensão no aço acompanha o aumento do carregamento da estrutura até à carga máxima funcionando como um

conjunto solidário. Ao atingir a carga de rotura é verificado novamente um escorregamento na interface provocando uma quebra da carga e uma diminuição da solitação do aço. Durante a restante duração do ensaio, os mecanismos de transferência de carga continuam a funcionar parcialmente conseguindo manter uma carga residual até ao final do ensaio.

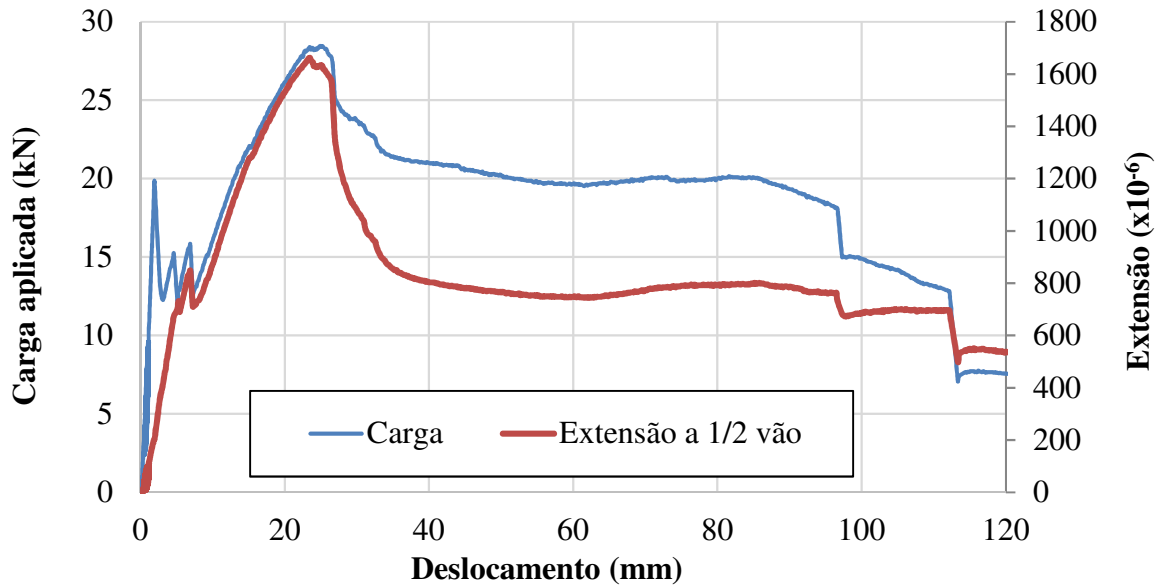


Figura 35 – Curvas carga / deslocamento e extensão/deslocamento (LC 1.4)

- **Laje $h_t = 15 \text{ cm}$ (Laje LC 2.4)**

Na Figura 36 é ilustrado o modo de rotura observado no ensaio realizado na laje LC 2.4, laje com $h_t = 15 \text{ cm}$, e o mapeamento da fendilhação observada no betão. A rotura observada foi semelhante à registada na laje com 13 cm de espessura (laje LC 1.4), verificando-se uma fissuração mais próxima dos pontos de aplicação da carga. A rotura foi igualmente uma rotura do tipo II por corte longitudinal.

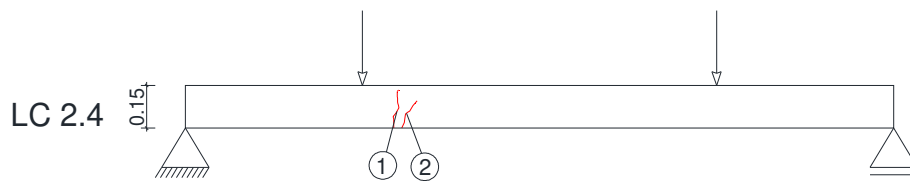


Figura 36 – Ilustração da fissuração e posição relativa das fissuras da laje LC 2.4 ($h_t = 15$ cm)

Na Figura 37 é possível verificar o mesmo comportamento inicial registado nos ensaios das lajes com $h_t = 13$ cm em que a chapa é mobilizada após o primeiro escorregamento na interface. A curva de extensão mostra que a variação de tensão instalada na chapa acompanha o desenvolvimento da carga até ao terceiro pico, zona onde divergem devido à redistribuição da transferência mecânica de carga para zonas mais próximas dos apoios, aliviando a secção a meio vão. Constata-se que há uma recuperação significativa da carga, conseguindo recuperar a capacidade resistente até 37 kN correspondentes a 63,18 mm de deslocamento vertical. Segundo o Eurocódigo 4, esta laje apresentou um comportamento

frágil.

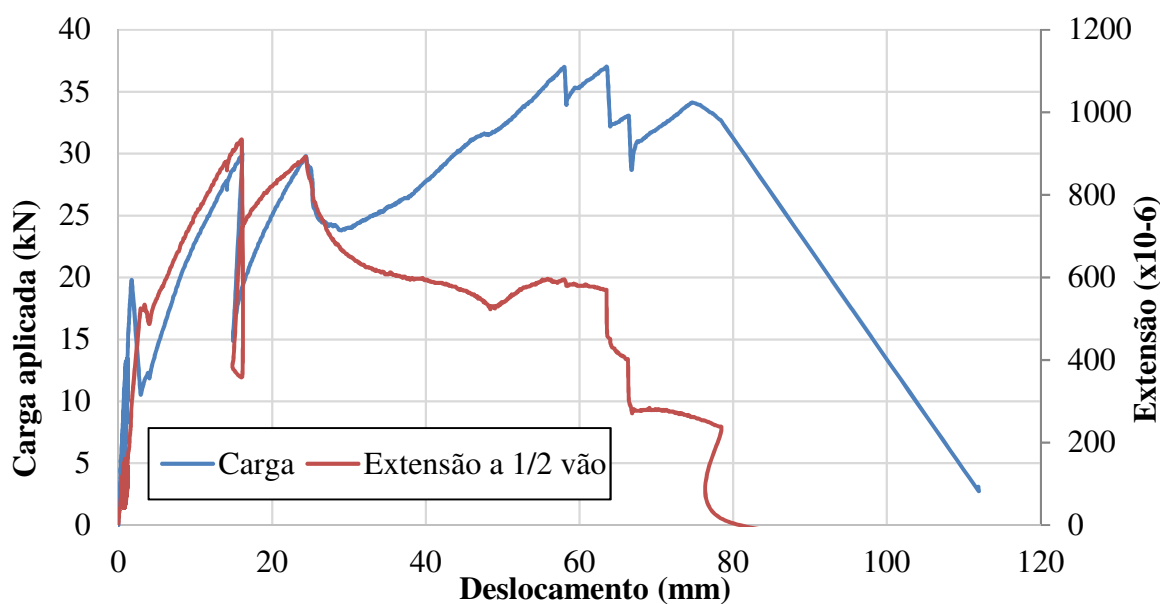


Figura 37 – Curvas carga / deslocamento e extensão/deslocamento (LC 2.4)

5.1.3. Modos de rotura

Durante todos os ensaios efetuados aos 8 elementos de lajes mistas, a rotura verificou-se sempre pelo corte longitudinal excessivo entre o betão e a chapa colaborante, confirmando-se assim o modo mais frequente neste tipo de lajes, o modo de rotura do tipo II (por corte longitudinal). A interação entre os dois materiais verificou-se ser parcial, onde o escorregamento apresentou valores entre zero (interação nula) e o valor máximo (interação total).

5.1.4. Curvas carga / deslocamento

Nesta secção são apresentadas as curvas carga / deslocamento obtidas nos ensaios de flexão de 4 pontos às lajes de $h_t = 13$ cm e $h_t = 15$ cm.

Na Figura 38 são apresentadas as curvas obtidas nos ensaios com lajes de 13 cm de espessura.

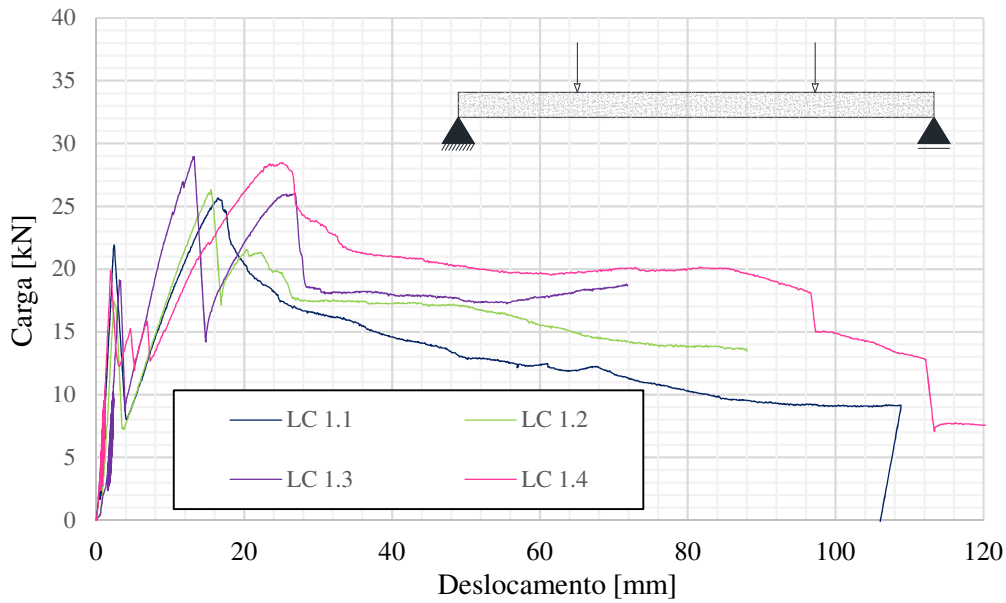


Figura 38 – Resumo curvas carga-deslocamento das lajes com $h_t=13$ cm

Na Figura 39 são apresentadas as curvas obtidas nos ensaios com lajes de 15 cm de espessura.

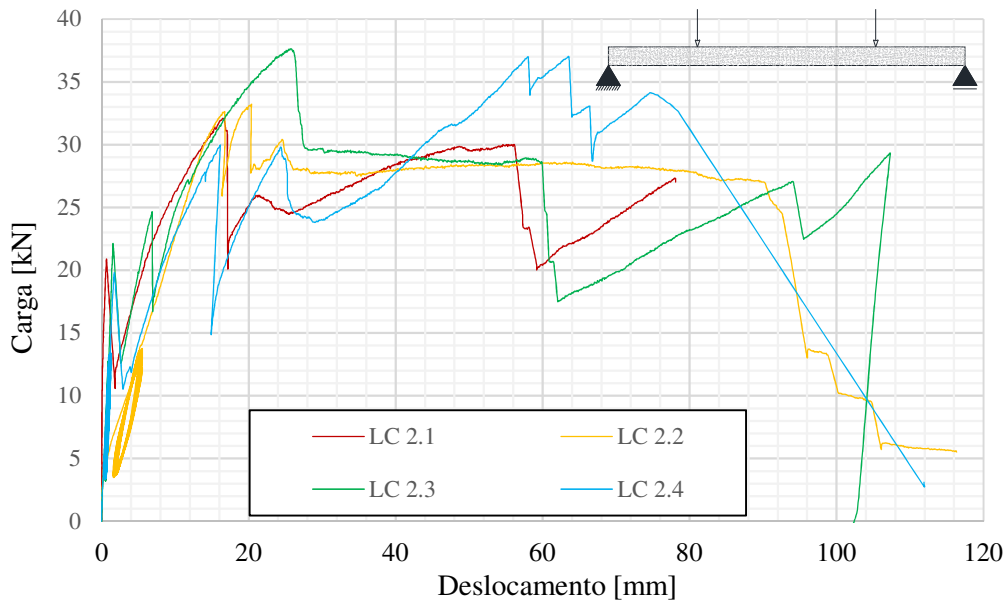


Figura 39 – Resumo curvas carga-deslocamento das lajes com $h_t=15$ cm

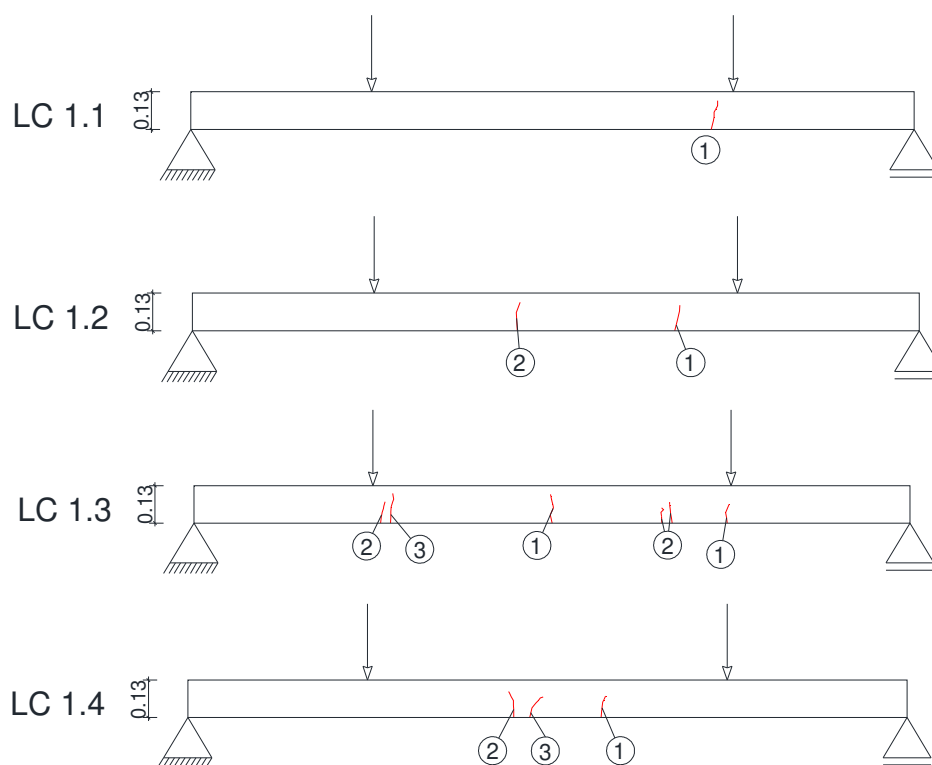
5.2. Discussão dos resultados obtidos

Pela análise dos resultados obtidos na realização dos ensaios, pode-se observar que não há uma variação significativa das cargas máximas para cada conjunto de ensaios. O momento máximo e esforço transverso mantêm-se também constantes por dependerem diretamente da carga aplicada.

No decorrer dos ensaios, foi notado que as primeiras fissuras surgiram aproximadamente a um quarto e a um terço de vão, características típicas da rotura por corte longitudinal, confirmando-se assim uma rotura do tipo II.

Observou-se na maioria dos ensaios uma capacidade de manter uma carga residual após se atingir a carga máxima.

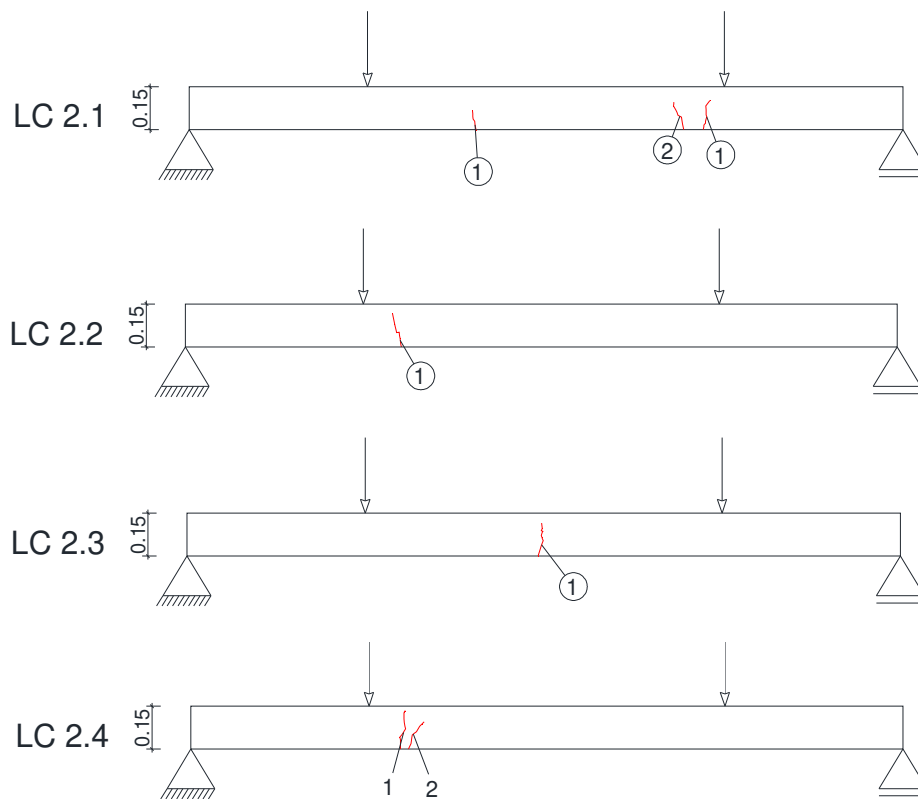
Nas Figura 40 e Figura 41 estão representadas as localizações das fissuras pela ordem que surgiram, bem como um exemplo fotográfico para cada espessura de laje.





Nota: ordem de aparecimento de fissuras representada pela numeração.

Figura 40 – Modo de rotura observado nas lajes com $h_t = 13$ cm





Nota: ordem de aparecimento de fissuras representada pela numeração.

Figura 41 – Modo de rotura observado nas lajes com $h_t = 15$ cm

Segundo o Eurocódigo 4, se a carga máxima for alcançada para um deslocamento vertical maior que $L/50$, a carga de rotura deve ser considerada como a carga em que se atinge esse deslocamento. O comportamento face ao corte longitudinal pode ser considerado dúctil se a carga máxima exceder 10% da carga registada para um escorregamento de 0.1 mm.

Pela análise da Tabela 10 e da Tabela 11, é possível verificar que a carga máxima é sempre atingida antes do limite de 50 mm ($L/50$) à exceção do ensaio com a laje de 15 cm, laje LC 2.4. De acordo com a verificação referida anteriormente, o Eurocódigo classifica o comportamento destes ensaios como dúctil ou frágil.

Pela análise da curva carga / deslocamento da laje LC 1.2 ($h_t = 13$ cm), (ver Figura 42) há um aumento de carga até 16 kN, dando-se o primeiro escorregamento da interface provocando uma quebra de carga e mobilizando a chapa colaborante. Após esta quebra, volta a haver uma subida de carga até ao seu valor máximo, 26,30 kN, momento em que ocorre a rotura do conjunto. A partir da carga de pico, mantém-se uma carga residual na restante duração do ensaio, comprovando assim a ductilidade do conjunto. Os restantes ensaios às lajes com $h_t = 13$ cm exibiram o mesmo comportamento desta laje tomada como exemplo.

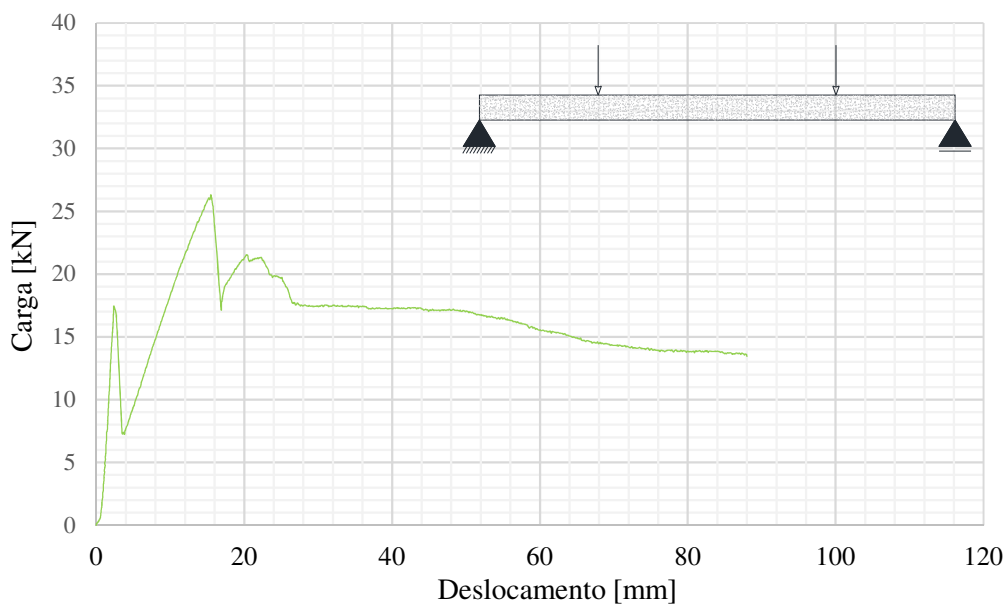


Figura 42 – Curva carga / deslocamento da laje LC 1.2

As lajes com $h_t = 15$ cm apresentaram o mesmo comportamento que as lajes de 13 cm como descrito no parágrafo anterior à exceção da laje LC 2.4.

Como se pode observar pela Figura 43, a laje LC 2.4 exibe um comportamento similar às restantes, diferenciando após os 23 mm de deslocamento. A partir deste ponto houve uma recuperação de carga significativa fazendo com que se alcançasse a carga máxima de 37,0 kN com 63,18 mm de deslocamento. Devido a este facto, o ensaio da laje LC 2.4 é o único onde se considera um comportamento frágil segundo as verificações do Eurocódigo 4.

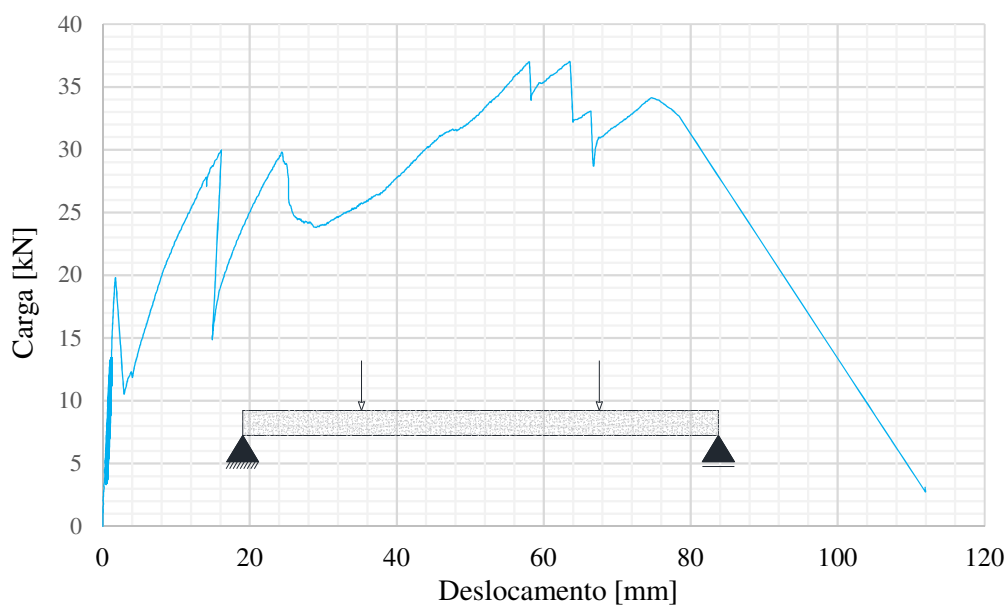


Figura 43 – Curva carga / deslocamento da laje 2.4

O escorregamento no momento da carga máxima apresenta uma maior dispersão de resultados por ser um fenómeno aleatório dependendo da interação aço-betão, de laje para laje. Estes escorregamentos tiveram um valor máximo de 2,15 mm na laje LC 1.4 e um valor mínimo de 0,27 mm na laje LC 2.1.

O deslocamento vertical a meio vão manteve-se constante nos vários ensaios exceto na laje LC 2.4 onde houve uma grande recuperação de carga após vários escorregamentos na interface fazendo com que se obtivesse um valor de deslocamento da carga máxima de 63,18 mm, como se pode verificar na Figura 43.

As tensões máximas registadas na chapa assumiram valores de 346,5 MPa e 196,14 MPa, para as lajes de $h_t = 13$ cm e $h_t = 15$ cm, respetivamente. Devido às lajes de maior espessura possuírem uma maior altura útil, a tensão máxima foi menor devido a se ter atingido a resistência ao corte longitudinal antes de se conseguir mobilizar mais resistência no aço. A chapa nas lajes de $h_t = 13$ cm atingiram uma tensão próxima da cedência, como se pode comparar com a tensão $f_{yd} = 353$ MPa obtida por (Baptista, 2015) nos ensaios à tração realizados com o mesmo tipo de chapa.

5.3. Comparação com resultados de referência

Nesta secção será realizada uma análise comparativa dos resultados dos ensaios obtidos nesta investigação com alguns trabalhos de referência.

Na Figura 44 é possível observar a reta ($y=53,548x+0,0693$) obtida por Penza em 2010, em Coimbra, ao ensaiar lajes mistas aço betão fabricadas com agregados leves. Os elementos ensaiados pelo autor eram similares na maior parte das suas propriedades às lajes ensaiadas no presente trabalho. Foram utilizadas lajes com 2500 mm de vão, 150 mm de espessura total, chapa colaborante S250GD com 0,7 mm de espessura e uma classe de betão LC25/28.

É possível observar que a posição dos dados adquiridos nos ensaios realizados é coincidente com a reta obtida, devido ao facto de a forma da chapa e as suas características serem semelhantes. Deste modo destaca-se um comportamento semelhante às lajes testadas neste trabalho.

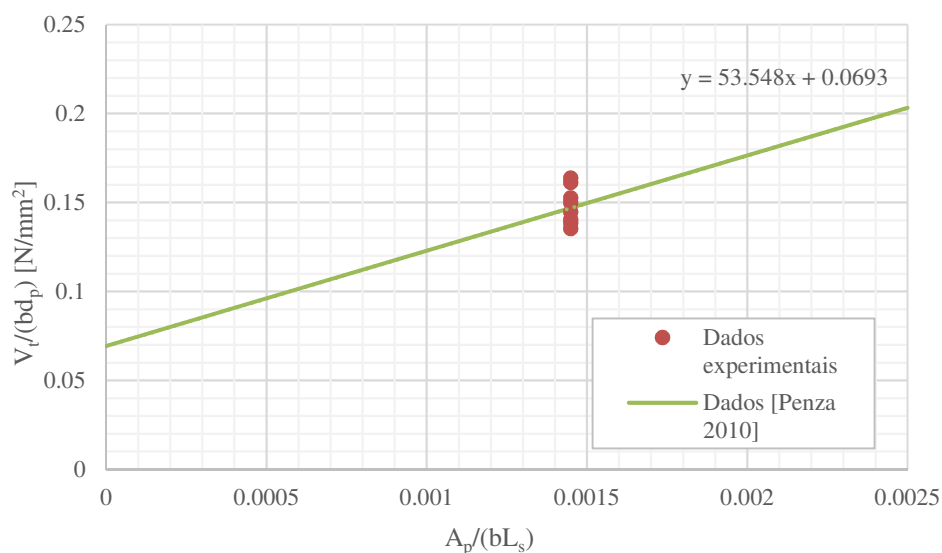


Figura 44 – Comparação com ensaios realizados por Penza em 2010 (Penza, 2010)

Porter e Ekberg (1975) referem no seu trabalho que a maioria das lajes colaborantes não evidenciam escorregamento na interface antes de atingirem a carga máxima. Pelos ensaios realizados, é possível comprovar que com este tipo de chapa utilizada, com estes mecanismos de transferência de carga na alma, existe escorregamento durante toda a duração do ensaio. Contudo esta afirmação poderá ser verdadeira no caso de ser utilizado outro mecanismo de transferência na interface ou de conetores.

Durante todos os ensaios verificou-se que todas as lajes apresentaram o corte longitudinal como modo de rotura, pelo que cumpre as disposições B 3.2 (6) da EN 1994-1-1, bem como um comportamento dúctil (à excessão da laje LC 2.4).

6. Conclusão e desenvolvimentos futuros

6.1. Principais conclusões

A partir dos ensaios realizados com lajes mistas utilizando uma chapa colaborante BC70 para avaliação da sua resistência, modo de colapso e tipo de interação, foi possível retirar as seguintes conclusões:

- Para o vão ensaiado ($L=2,5$ m), o corte longitudinal é o esforço condicionante, não se verificando nenhuma rotura por flexão ou corte vertical;
- Os ensaios demonstraram que o conjunto aço / betão possui um comportamento dúctil, mantendo uma carga residual e continuando a resistir após escorregamento na interface;
- Após a realização dos ciclos de carga para quebra da adesão na interface, continuou a haver transmissão de esforços mecanicamente através das saliências nas almas, demonstrada pelo tipo de ductilidade evidenciada pelas curvas de comportamento;
- As lajes apresentaram um comportamento semelhante para pequenos deslocamentos;
- A capacidade resistente obtida nos ensaios individuais em cada conjunto ensaiado é semelhante, sendo bastante homogéneos dentro de cada conjunto;
- As lajes de 15 cm apresentaram um comportamento com maior ductilidade quando comparadas com as de 13 cm, apresentando por vezes um patamar com endurecimento após fissuração do betão.
- Com o aumento da espessura das lajes de $h_t = 13$ cm para $h_t = 15$ cm foi verificado um aumento da capacidade resistente de aproximadamente 28%, registando-se valores de 27,34 kN e 35,03 kN, respetivamente.
- Concluiu-se ainda que a rotura nas lajes de $h_t = 13$ cm e $h_t = 15$ cm ocorria para deslocamentos verticais a $\frac{1}{2}$ vão em torno de 20 mm.

Por fim, pode-se concluir que estas lajes são uma solução eficiente e viável com inúmeras possibilidades de aplicação, tirando partido das vantagens de dois materiais.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Após a conclusão deste trabalho, constata-se que ainda há potencial para diversos estudos utilizando este tipo de chapa colaborante.

Em primeiro lugar, a realização de ensaios semelhantes aos deste trabalho, com diferentes vãos, seria oportuno para a obtenção dos parâmetros m e k , necessários para o dimensionamento deste tipo de lajes.

Observou-se na bibliografia analisada, que a espessura da chapa desempenha um papel relevante na resistência ao corte longitudinal do conjunto. Deste modo, seria interessante a realização de ensaios com diferentes espessuras.

Outra opção relevante de um estudo futuro seria a análise que a continuidade nos apoios provoca na capacidade resistente da laje mista.

Por último destaca-se a introdução de conectores de ligação, de modo a estabelecer uma comparação com a transmissão de esforços mecânica por saliências entre a chapa e betão utilizado pelos ensaios realizados.

Bibliografia

- ArcelorMittal. (2009). Catálogo Lajes Mistas.
- ASCI 3-91. (1992). Standard For The Structural Design Of Composite Slabs.
- Baptista, J. (2015). *Análise experimental de telha de aço autoportante*. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Leiria.
- BS 5950. (1994). BS 5950-4:1994 - Code of Practice for Design of Composite Slabs With Profiled Steel Sheeting. BSI Group.
- Calado, L., & Santos, J. (2010). *Estruturas Mistas de Aço e Betão*.
- Crisinel, M., Fidler, M. J., & Daniels, B. J. (1986). Behaviour of steel deck reinforced composite floors.
- Daniels, B. J., & Crisinel, M. (1988). Composite Slabs with Profiled Sheeting. In *Proceedings of an Engineering Foudation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete*.
- EN 10346. (2009). Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions. CEN.
- EN 1993-1-3. (2006). Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN.
- EN 1994-1-1. (2004). Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. CEN.
- EN1993-1-5. (2006). Design of steel structures - Plated structural elements. CEN.
- Heagler, R. B., Luttrell, L. D., & Easterling, W. S. (1991). Steel Deck Institute, (Composite Deck Design Handbook).
- Lopes, E. (2005). *Comportamento de Lajes Mistas Aço-Betão*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Luttrell, L. D. (1987). Flexural Strength of Composite Slabs. *Elsevier Science Publishing Co.*, (Composite Steel Structures-Advances, Design and Construction).
- NP EN 1990. (2009). *Eurocódigo 0: Bases para o projecto de estruturas, Termo de Homologação nº 516/2009, de 29 de Dezembro, IPQ*.
- NP EN 1991-1. (2009). *Eurocódigo 1: Ações em estruturas. Parte 1-1: Acções gerais, Pesos*

- volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, Termo de Homologação n.º 517/2009, de 29 de Dezembro, IPQ.*
- NP EN 1993-1-1. (2010a). *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Regras gerais e regras para edifícios, Termo de Homologação n.º 62/2010. IPQ.*
- NP EN 1993-1-1. (2010b). *Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Regras gerais e regras para edifícios, Termo de Homologação n.º 62/2010. IPQ.*
- NP EN 206-1. (2005). *Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Termo de Homologação N.º 88/2006. IPQ.*
- Penza, A. (2010). *Composite Slabs with Lightweight Concrete*. Tese de Mestrado, Politécnico de Milão.
- Porter, M. L., & Ekberg, J. C. E. (1975). Design recommendatios for steel deck floor slabs. *ASCE Journal Structural Division*, 102(11), 2121–2136.
- Rackham, J. W., Couchman, G. H., & Hicks, S. J. (2009). *Composite slabs and beams using steel decking : best practice for design and construction*.
- Samuel Easterling, W., & Young, C. S. (1992). Strength of Composite Slabs. *Journal of Structural Engineering*, 118(9), 2370. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:9\(2370\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:9(2370))
- Schuster, R. M. (1970). *Strength and behavior of cold-rolled steel-deck- reinforced concrete floor slabs*. Tese de Doutoramento, Universidade de Iowa.
- Seleim S. S. (1979). *Ultimate shear-bond capacity of composite steel deck concrete slabs*. University of Waterloo.
- Seleim, S., & Schuster, R. (1985). Shear-Bond Resistance of Composite Deck-Slabs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12.
- Sputo, T. (2012). Development of composite steel decks, (May), 27–28.
- Stark, J. W. B. (1978). Design of Composite Floors with Profiled Steel Sheet. *University of Missouri-Rolla*.
- Szumigala, M., Szumigala, E., & Polus, Ł. (2017). *An Analysis of the Load-Bearing Capacity of Timber-Concrete Composite Beams with Profiled Sheeting*. *Civil and Environmental Engineering Reports* (Vol. 27). <https://doi.org/10.1515/ceer-2017-0057>

Anexos

em que $\bar{\lambda}_p$ é a esbelteza da chapa definida por:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}$$

em que:

t espessura da chapa;

σ_{cr} tensão crítica da chapa;

k_σ coeficiente de encurvadura da chapa determinado em função da relação entre tensões, tabela Y;

\bar{b} largura de cálculo da chapa;

$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ com f_y em N/mm².

Tabela A.2 – Coeficientes de encurvadura, k_σ , para elementos internos comprimidos

$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$	Coeficiente de encurvadura k_σ
1	4,0
$1 > \psi > 0$	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$
0	7,81
$0 > \psi > -1$	$7,81 - 6,29\psi + 9,78 \psi^2$
-1	23,9
$-1 > \psi > -3$	$5,98 (1 - \psi)^2$

A expressão seguinte permite calcular o valor do momento de inércia de um retângulo em relação a um eixo inclinado α relativamente a um eixo principal central de inércia:

$$I_a = I_y \cos^2 (\alpha) + I_z \sin^2 (\alpha)$$