



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

David Rodrigues Carvalheiro

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE
VIGAS MISTAS COMBINANDO AÇO
ENFORMADO A FRIO E BETÃO LEVE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora Aldina Santiago e pelo Professor Doutor Luís Laím e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021



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

David Rodrigues Carvalheiro

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS MISTAS COMBINANDO AÇO ENFORMADO A FRIO E BETÃO LEVE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COMPOSITE SLABS COMBINED WITH COLD FORMED STEEL AND LIGHTWEIGHT CONCRETE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pela Professora Doutora Aldina Santiago e pelo Professor Doutor Luís Laím

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

Coimbra, 28 de outubro de 2021

“A genius is the man who can do the average thing when everyone else around him is
losing his mind”

Napoleon

“The world is full of obvious things which nobody by any chance ever observes”

Sherlock Holmes

AGRADECIMENTOS

No limiar de terminar uma fase fulcral da minha vida, gostaria de agradecer a todos os que fizeram parte e contribuíram para esta jornada.

Começo por agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago, ao Professor Doutor Luís Miguel dos Santos Laím e ao Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro pela disponibilidade e auxílio prestado no decorrer desta dissertação.

Quero também agradecer à equipa do Laboratório, Doutor Cláudio Martins, Engenheiro João Luís Caetano Vidal, Miguel Queirós Mendes Santos e Engenheiro Ilídio Miranda dos Santos, que de forma ativa estiveram envolvidos no projeto de investigação INNOCFSCONC, assim como a Universidade de Coimbra e ao Departamento de Engenharia Civil.

Um agradecimento a todos os colegas de faculdade, em particular Elias Siva, Marco Lopes, Miguel Malheiro, Nil Agues, Patrícia Freitas e Nuno Gomes, pelos desafios e pelas conversas partilhadas, ao longo deste último ano.

À minha família, em particular aos meus pais, irmão e cunhada, pelo apoio e condições criadas de modo a atingir este patamar.

Agradecimento à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo apoio ao projeto de investigação PTDC/ECI-EGC/31858/2017- INNOCFSCONC - Solução estrutural híbrida inovadora com recurso a aço enformado a frio e betão leve, financiado por fundos do FEDER, Programa – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT.

Cofinanciado por:



RESUMO

Soluções e elementos de aço enformado a frio são extremamente versáteis, e nas últimas décadas a sua quota de mercado tem crescido significativamente. A sua versatilidade pode ser ainda explorada combinando perfis de aço enformado a frio entre si com outros materiais, nomeadamente o betão leve, criando assim soluções estruturais inovadoras de elevado valor acrescentado. Além disso, recorrendo a estes materiais estruturais é também possível explorar a pré-fabricação e modularidade. Neste trabalho serão estudadas vigas mistas inovadoras compreendendo elementos de aço enformado a frio dispostos de modo a criar secções em I, ou secções total/parcialmente preenchidos por betão leve. Assim, serão realizados ensaios experimentais de carga em vigas mistas aço-betão leve para avaliação da sua capacidade de carga ao corte e à flexão e possíveis fenómenos de encurvadura (locais e globais). Será também analisado o nível de restrição proporcionado pelo betão leve aos fenómenos de encurvadura local, tradicionalmente associados a perfis metálicos de paredes finas, assim como o nível de conexão entre viga e laje.

Os resultados experimentais foram posteriormente comparados com as previsões com base na EN 1994-1-1.

Este trabalho enquadra-se no projeto de investigação “INNOCFSCONC - Innovative hybrid structural solutions using cold-formed steel and lightweight concrete”.

Palavras-chave: Aço enformado a frio; betão leve; Construção mista; Estruturas mistas, Vigas mistas;

ABSTRACT

Cold-formed steel solutions and elements are extremely versatile, and in recent decades their market share has grown significantly. Its versatility can also be exploited by combining cold-formed steel profiles with other materials, namely lightweight concrete, thus creating innovative structural solutions with high added value. Furthermore, using these structural materials it is also possible to explore prefabrication and modularity. In this work, innovative composite beams will be studied comprising cold-formed steel elements assembled to create I-sections, or sections fully/partially filled with lightweight concrete. Thus, experimental load tests will be carried out on light steel-concrete composite beams to assess their load capacity when shear and bending and possible buckling phenomena (local and global). It will also be analyzed the level of restriction provided by lightweight concrete to local buckling phenomena, traditionally associated with thin-walled metal profiles, as well as the level of connection between beam and slab. Experimental results will later be compared with predictions based on EN 1994-1-1.

This work is part of the research project “INNOCFSCONC - Innovative hybrid structural solutions using cold-formed steel and lightweight concrete“.

Keywords: Cold-formed steel; lightweight concrete; Mixed construction; Mixed structures, Mixed beams;

ÍNDICE –

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice –	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros	x
Abreviaturas.....	xi
Simbologia.....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Referência histórica	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Organização da dissertação.....	5
2 Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Trabalhos prévios.....	7
2.1.1 Chapa	7
2.1.2 Conectores	8
2.1.3 Viga mista.....	9
2.2 Processo de fabrico do aço enformado a frio.....	12
2.2.1 Perfis e chapa.....	12
2.2.2 Vantagens e Desvantagens do aço enformado a frio.....	14
2.2.3 Imperfeições geométricas	15
2.2.4 Tensões residuais	15
2.3 Betão Leve	16
3 Normas e dimensionamento	18
3.1 Introdução	18

3.2	Betão leve	18
3.2.1	Generalidades	18
3.2.2	Resistência	18
3.3	Verificações segundo o Eurocódigo 3 (EN 1993)	19
3.3.1	Generalidades	19
3.3.2	Classificação das secções	19
3.4	Verificação da alma	19
3.5	Dimensionamento segundo o Eurocódigo 4 (EN1994-1).....	21
3.5.1	Situações de dimensionamento – ações e efeitos das ações	21
3.5.2	Fase construtiva	22
3.5.3	Fase definitiva	22
3.5.4	Resistência ao corte longitudinal.....	22
3.5.5	Resistência ao fogo.....	26
4	Campanha experimental.....	27
4.1	Introdução	27
4.2	Esquema dos ensaios	27
4.3	Montagem das lajes mistas	29
4.4	Instrumentação das lajes mistas	33
4.5	Montagem do Layout.....	34
4.6	Características dos materiais.....	37
4.6.1	Betão leve	38
4.6.2	Aço enformado a frio.....	39
5	Apresentação e discussão dos resultados	41
5.1	Laje 4 (Conexão Parcial com reforço do banzo inferior)	41
5.1.1	Modos de Colapso	41
5.1.2	Capacidade de carga	43
5.1.3	Evolução das deformações, deslocamentos e extensões	43
5.2	Laje 3 (Conexão Total com e reforço no banzo inferior)	45
5.2.1	Modos de Colapso	45
5.2.2	Capacidade de Carga	46

5.2.3	Evolução das deformações, deslocamentos e extensões	47
5.3	Laje 2 (Conexão parcial).....	48
5.3.1	Modos de Colapso	48
5.3.2	Capacidade de Carga	50
5.3.3	Evolução das deformações, deslocamentos e extensões	50
5.4	Laje 1 (Conexão total)	51
5.4.1	Modos de Colapso	51
5.4.2	Capacidade de Carga	53
5.4.3	Evolução das deformações, deslocamentos e extensões	53
5.5	Comparação de resultados	55
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	56
6.1	Trabalhos futuros	57
	Referências Bibliográficas.....	58
	Anexo A.....	A

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 a) Laje mista e pilar metálico b) Laje mista e pilar misto.....	2
Figura 1.2 a) Moagem do Caramujo (Fonte: Microobservatório). b) Ponte Luís Bandeira	4
Figura 2.1 – a) Componentes da laje mista com varões adicionais, b) Fissuras devido a momento fletor, c) Escorregamento longitudinal (Grossi et al, 2015)	7
Figura 2.2 – a) Conector Simples (SBSC), b) Conector Duplo (DBSC), c) Conector de perfil laminado a quente (HPSC) (Mustapha Muhammad Lawan et al,2016.).....	8
Figura 2.3 – a) Esmagamento do betão, b) Esmagamento da alma c) Verificação do estado dos conectores (Rosli et al,2015)	9
Figura 2.4 – a) Encurvadura por esforço transverso, b) Esmagamento do betão (M. M. Lawan et al,2020)	10
Figura 2.5 – a) Secção transversal proposta, b) Tipos de conectores (SBSC), (DBSC), (HPSC) (S O Bamaga et al,2019).....	10
Figura 2.6 – a) Verificação do estado dos conectores, b) Vista transversal do provete (Alhajri et al, 2016)	11
Figura 2.7 – Perfiladora (algoro@, 2020)	12
Figura 2.8 – a) Quinadora de moldagem de AEF (ferrol2industria@) e b) Processo de quinagem (Arsedys@).....	13
Figura 2.9 – Secções típicas utilizadas com perfis em aço enformado a frio, a) Perfis, b) Formação de secções abertas, c) Formação de secções fechadas (EC4)	13
Figura 2.10 –a) Chapa de cobertura (ofeliz@, b) Chapa perfilada colaborante (Perfitec@) ...	13
Figura 2.11 Imperfeições geométricas. a) Imperfeições na alma, b) Imperfeições nos banzos (Schafer and Peköz, 1998).....	15
Figura 2.12 Definição das tensões residuais de membrana e flexão. (Díaz e Cuesta, 2021) ...	16
Figura 2.13 Tensão residual de flexão. a) Perfilagem. b) Quinagem. (Díaz e Cuesta, 2021) ..	16
Figura 3.1 Resistência ao esforço transverso com encurvadura f_{yb}	21
Figura 3.2 Limites máximo do fator de redução kt	24
Figura 3.3 Relação entre o momento resistente e a força no betão (EC4)	25
Figura 4.1 Sistema simplesmente apoiado com contraventamento lateral	28
Figura 4.2 Perfis em AEF. a) Perfil C140. b) Perfil C240. c) Perfil H60.....	28
Figura 4.3 Configuração dos quatro provetes analisados (mm)	29
Figura 4.4 – a) e b) Montagem das vigas em AEF. c) Aplicação das chapas colaborantes. d) e e) Esquema de montagem com as distâncias a colocar os parafusos autoperfurantes.	30
Figura 4.5 – a) Esquema de aplicação do conector. b) Laje mista de conexão parcial. c) Laje mista de conexão total	31
Figura 4.6 – a) Laje nivelada antes da cofragem. b) Laje com cofragem e armadura mínima e de flexão negativa. c) Esquema de preparação da cofragem.	32

Figura 4.7 – a) Vibrador tecnoflex rabbit para betão. b) Placa vibratória. c) e d) Transporte e deposição do betão. e) Laje mista após betonagem. f) Provetes de betão	33
Figura 4.8 – a) Materiais utilizados na instrumentação	34
Figura 4.9 – Procedimento de colagem dos extensómetros	34
Figura 4.10 – a) e b) Montagem do layout, c) Monitorização dos dados, d) Esquema do layout com as medidas	35
Figura 4.11 – a) Vista longitudinal da totalidade dos extensómetros, b) Vista transversal dos extensómetros na alma, c) Vista transversal dos extensómetros nos banzos	36
Figura 4.12 – a) Esquema da posição dos LVDT's, b) Vista transversal da secção de meio vão dos LVDT's, c) Pormenor dos LVDT's 11 e 13	37
Figura 4.13 – a) Atuador hidráulico walter + bai. b) Provetes após solicitação de resistência	38
Figura 4.14 – a) Unileve estrutural (Adaptado de UniLeve Estrutural)	39
Figura 4.15 – a) Layout de ensaio a temperatura ambiente, b) Dimensões do provete (Craveiro,2015)	40
Figura 4.16 – a) Curvas de tensão-extensão (Craveiro,2015)	40
Figura 5.1 – Sistema de carregamento de 6 pontos	41
Figura 5.2 – Características da laje 4	41
Figura 5.3 – a) Início da rotura em estado plástico. b) Rotura total do provete. c) Pormenor do esmagamento da alma e no banzo superior assim como fissuras no betão.	42
Figura 5.4 – Comparação dos modos de rotura em ambas as extremidades. e) Reduzidos danos. f) Danos a nível de fissuras no betão, separação do betão da chapa, esmagamento da alma e corte longitudinal	42
Figura 5.5 - Deformada, a) Vista inferior, b) Vista superior	43
Figura 5.6 – Deformações verticais e horizontais	44
Figura 5.7 – Extensões laje 4	44
Figura 5.8 – Características da laje 3	45
Figura 5.9 – Modos de rotura para a laje 3, a) Deformada da laje e separação do betão da chapa na extremidade, b) Esmagamento da alma e banzo superior, c) Fissura no betão e esmagamento da alma e banzo superior, e) e f) Comparação dos modos de rotura em ambas as extremidades, observando-se em f) Esmagamento da alma, do banzo superior, corte longitudinal pela inclinação dos conectores e separação do betão da chapa	46
Figura 5.10 – Extensões fibras mais afastadas E3 (banzo inferior) e fibras menos afastadas E4 (banzo superior)	47
Figura 5.11 – Deslocamentos da laje 3	47
Figura 5.12 – Características da laje 2	48
Figura 5.13 – a) e b) Separação do betão da chapa nas extremidades, c) Fissuras devido a esforço transversal, d) Plastificação do aço (Zona de estricção), e) e f) Separação do betão da chapa a meio vão. Corte longitudinal e esmagamento do banzo superior e alma.	49
Figura 5.14 – Deslocamentos da laje 2	51

Figura 5.15 – Extensómetros banzo superior e banzo inferior, meio vão	51
Figura 5.16 – Características da laje 1	52
Figura 5.17 – a) Fissuração no betão, b) Deformada quando que formam fissuras no betão, c) Esmagamento do banzo superior e alma, d) Plastificação do aço, zona de estrição, e) Deformação final, f) Efeito do esforço de corte	53
Figura 5.18 – Deslocamentos da laje 1	54
Figura 5.19 – Extensões laje 1	54

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Resultados dos testes de compressão nos cubos em betão leve	38
Quadro 5.1 – Carga obtida experimentalmente para a laje 4.....	43
Quadro 5.2 – Carga obtida experimentalmente para a laje 3.....	47
Quadro 5.3 – Carga obtida experimentalmente para a laje 2.....	50
Quadro 5.4 – Carga obtida experimentalmente para a laje 1.....	53
Quadro 5.5 – Carga obtida experimentalmente e pelo Eurocódigo 4 parte 1-1	55

ABREVIATURAS

AEF	Aço enformado a frio
EC3	Eurocódigo 3
EC4	Eurocódigo 4
LVDT	Transformador Diferencial variável linear
SG	Extensómetro

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas latinas

A_c Área da secção da espécie em qua a força de compressão atua

A_{sf} Área da secção de reforço transversal

E_a Módulo de elasticidade do aço

E_{lcm} Módulo de elasticidade do betão leve

F é a carga máxima na rotura

M_{Rd} Valor de resistência do momento de secção composta à flexão

N_c Força de compressão no betão

$P_{pb,Rd}$ Valor de resistência da conexão

P_{Rd} Valor de resistência de um conector

$R_{w,Rd}$ Valor de cálculo de esforço transversal localizado

$V_{b,Rd}$ Valor de cálculo da encurvadura da alma da secção

Letras minúsculas latinas

b_{eff} Largura efetiva total

γ_{M0} Coeficiente parcial de segurança de resistência da secção

γ_{M1} Coeficiente parcial de segurança de resistência do membro

d_{do} Diâmetro do conector

f_c Valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

f_y Valor de cálculo da tensão de cedência do aço estrutural à tração

f_{yb} Valor da resistência do esforço transversal considerando encurvadura

$f_{yp,d}$	Valor de resistência do aço da chapa colaborante
f_u	Valor de cálculo da tensão última
h	Altura da secção
h_w	Altura da alma entre a linha média dos banzos
n_r	Número de conectores
k_t	Coefficiente de redução da resistência do conector
k_ϕ	Parametro
s_s	Comprimento equivalente do apoio
t	Espessura

Letras minúsculas gregas

η	Grau de conexão, coeficiente
ρ	Massa volúmica
$\bar{\lambda}_w$	Esbelteza relativa
λ_v	Fator parcial

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas notou-se um claro crescimento na procura e utilização das estruturas metálicas, especialmente em tipologias de construção como edifícios de habitação, industriais e comerciais. A escassez de mão de obra, os prazos cada vez mais curtos e o controlo de qualidade são condições que promovem esta tendência. A competitividade destas estruturas advém das possibilidades que esta oferece como processo de pré-fabricação de componentes em local controlado, consequentemente com menor impacto ambiental, sendo posteriormente a sua montagem executada *in situ*. É, portanto, um tipo de estrutura pouco afetado por condições locais e atmosféricas, sendo o maior ponto de conflito a dimensão das peças para transporte. Uma boa relação entre peso próprio e a elevada resistência permite criar estruturas com a maximização do material obtendo estruturas mais leves e esbeltas. O dimensionamento destas estruturas vem associado a fenómenos de instabilidade e deformações. Para fazer face a esta situação, é então que surgem as estruturas mistas, que combinam o aço com um material de longa data, o betão.

Recentemente têm vindo a ser estudadas outros tipos de soluções, nomeadamente soluções de menor espessura e com menor massa. Entramos assim nas construções em estrutura em aço leve, as quais começaram por ser utilizadas em massa em obras de reabilitação sendo posteriormente o seu potencial aplicado em construções novas totalmente em aço leve. A investigação inicial focou-se no comportamento destas soluções e posteriormente na sua aplicação no mercado de trabalho. Foi então que seguiu a possibilidade de criar uma solução de laje mista (Figura 1.1 a) e b)).

Inicialmente a solução mista não era vista como uma solução inovadora devido à resistência conjunta dos materiais, a solução focava-se na resolução nas duas maiores vantagens dos materiais aqui associados: a resistência dos materiais metálicos contra corrosão e a resistência ao fogo do betão. Contudo, um fator limitante do aço leve é a espessura que torna os perfis suscetíveis a torções, distorções laterais e encurvaduras locais. No caso de vigas, a resistência destas secções em aço enformado a frio, é melhorada adicionando uma laje de betão à secção metálica, utilizando sistemas de conexão que permitam um bom comportamento dos materiais. (Orientador and Barreto, 2008)

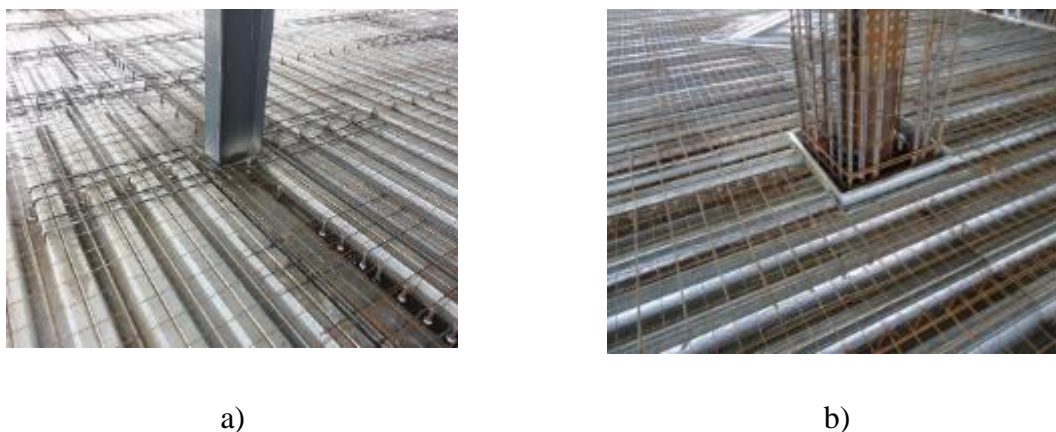


Figura 1.1 a) Laje mista e pilar metálico b) Laje mista e pilar misto

De modo a fazer face à grande procura por estruturas cada vez mais esbeltas, um fator condicionante é o peso próprio da estrutura. É então que surge o betão leve, uma mistura em tudo semelhante ao já conhecido, porém com um tipo de agregado menos denso. Assim como o aço leve, materiais como a argila expandida e esferovite começaram por inicialmente serem utilizados em elementos não estruturais, inclusive como asfalto de percursos para peões e ciclistas, por ser permeável e devido ao pouco desgaste que estes incutiam no pavimento. Observando as potencialidades que estes novos materiais dispunham, é então que se analisam as suas potencialidades de se começa a transitar para os elementos estruturais.

Apesar do elevado custo de fabricação, estas soluções estruturais apresentam várias vantagens comparativamente às soluções tradicionalmente utilizadas, este tipo de aço leve é 100% reciclável, ficando mais barato cerca de 30 a 40% que a tradicional construção com perfis laminados a quente.

Outro fator de grande importância entre os processos de fabrico dos perfis laminados a quente e os perfis laminados a frio, passa pela temperatura que este ocorre. Ao passo que nos perfis laminados a quente é necessário recorrer a temperaturas acima dos 1200°C, nos perfis em aço enformado a frio ocorre à temperatura ambiente.

É possível, através da otimização do processo construtivo de perfis em aço leve obter soluções bastante competitivas. Como principais vantagens da utilização de sistemas estruturais em aço, podem ser compreendidas o reduzido tempo de elevação da estrutura, assim como a simplicidade da montagem da mesma, conduzindo a um estaleiro de reduzidas dimensões, onde o que requer menor presença de mão de obra especializado. Tal eficácia só é possível graças ao desenvolvimento tecnológico dos sistemas de corte e montagem que compõem o processo de pré-fabricação das componentes de uma estrutura.

Em pontes e edifícios habitacionais, de escritórios e de estacionamentos, é recorrente tirar partido das lajes criando uma solução mista, criando uma solução que eleva as qualidades de ambos os materiais. Isto acontece pelo facto de o eixo neutro migrar para a parte superior da peça, aproveitando todo o betão para compressão. Ora, este último ponto é deveras importante, uma vez estarmos a falar de estruturas de aço leve de classe 4, em que para o seu aproveitamento à compressão seria necessário reduzir a área bruta para uma área efetiva de acordo com a norma, além de que associado à compressão estão presentes fenómenos de encurvadura. Assim, o betão confere à estrutura um bom comportamento à compressão, sendo que o aço confere boa ductilidade.

A utilização de aço leve é mundialmente reconhecida, maioritariamente como material para reabilitação de edifícios no campo não estrutural. Recentemente começou a ser utilizado de uma forma mais ativa no campo estrutural. Ora este material, aço leve enformado a frio, tem uma grande vantagem uma vez que as peças são cortadas e moldadas em estaleiro, estes recebem os rolos do material aço, já limitado pela largura devido ao seu transporte, que entram diretamente para máquinas de moldes betão apresenta um bom comportamento à compressão, enquanto o aço possui elevado desempenho à tração;

Nas estruturas mistas é necessário ter em consideração o método construtivo desde a fase do projeto até à execução da estrutura. Sendo criada por dois materiais com diferentes processos de fabrico e execução, os perfis e chapas em aço realizadas em fábrica e posteriormente acopladas em obra. Já no caso do betão, pode ser produzido numa central de betão ou em obra em ambiente controlado e posteriormente aplicado. Logo a seguir à sua aplicação, o betão começa a ganhar presa, até atingir a cura dos 28 dias, o que requer especial atenção à fase construtiva. Este tipo de construção permite que a própria chapa colaborante trabalhe como cofragem. Ainda assim, pode ser necessário recorrer a escoramento de modo a evitar deformação excessiva e efeito de poça ou no pior dos cenários levar ao colapso.(Calado & Santos, 2010).

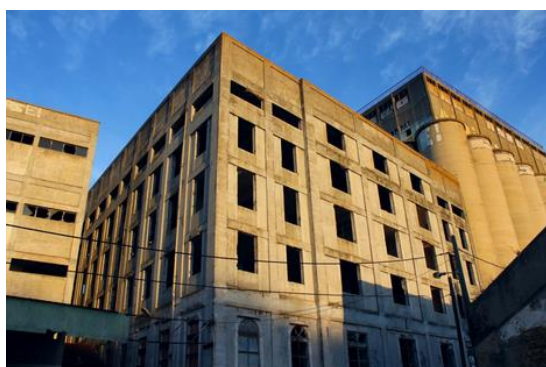
De facto, na sua maioria, a utilização das secções em AEF (aço enformado a frio) na Europa é mais corrente como madres. Contudo, mais recentemente, têm surgido avanços no desenvolvimento de soluções para uso estrutural, em colunas, vigas e paredes, como elemento principal e como treliças de cobertura. Estes desenvolvimentos acontecem a um ritmo cada vez maior, uma vez que o aço AEF está a tornar-se mais competitivo em preço comparado com a madeira e com o aço laminado a quente.

1.2 Referência histórica

As estruturas mistas surgiram em meados do século XIX, como o registe de uma patente para a construção de treliças feitas de madeira e ferro por parte de Howe. (Calado and Santos). No século XX começaram a ser efetuados estudos em diversas partes do mundo a nível das vigas mistas. Dominion Bridge, no Canadá em 1923 estudou as vigas envoltas em betão, já no Reino Unido no National Physical Laboratory, Scott publicou resultados em 1925. Apenas em 1944, nos Estados Unidos da América surgiu a regulamentação através da American Association of State Highway Officials.

O betão é utilizado há milhares de anos, tendo começado como uma mistura de argila com areia, cascalho e água. Só a partir de 1830 se encontram referências de betão armado, no entanto em 1848 o francês Jean-Louis Lambot. Apenas nos final do século XX começaram a ser publicados os primeiros estudos sobre o betão armado, com o comportamento do betão à flexão ser a primeira disciplina a ser criada de Betão Armado na ENPC – école National de Pontes et Chaussées. No início do século XX ocorre um desenvolvimento significativo na sua utilização e nas suas potencialidades à compressão. Em Portugal edifícios como a moagem de trigo do caramujo, a Ponte Luiz Bandeira de Sejães merece especial atenção por serem pioneiras. (Appleton, Julio)

O aço enformado a frio teve início na construção no Reino Unido e Nos Estados Unidos por volta de 1850, sendo que a partir da segunda guerra mundial se intensificou o seu uso.



a)



b)

Figura 1.2 a) Moagem do Caramujo (Fonte: Microobservatório). b) Ponte Luís Bandeira

(Fonte: Researchgate)

1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo a comparação experimental e teórica do comportamento estrutural de quatro tipologias diferentes de laje mista aço leve-betão leve, tendo como ponto de estudo o tipo de conexão, parcial ou total e viga com banzos iguais e banzos com áreas diferentes estando inserido no programa “INNOCFSCONC - Innovative hybrid structural solutions using cold-formed steel and lightweight concrete”, liderado pela Universidade de Coimbra. Os quatro modelos foram criados e ensaiados em laboratório, sendo posteriormente os resultados comparados com o dimensionamento previamente realizado de acordo com o eurocódigo 4. É dada especial atenção ao processo de montagem da secção, de modo a criar uma solução prática com possível utilização no mercado. Foram utilizadas duas classes de aço: para os perfis C240x2.5 e C140x2.0 utiliza-se aço SD280, mas nas chapas colaborantes utiliza-se aço SD320. O betão utilizado foi betão com agregado leve com densidade de 1400KN/m^3 da classe LC 16/18. Os conectores são parafusos M16 da classe 8.8 com dupla porca. Todos os provetes apresentam características geométricas diferentes, sendo dois deles estudados para conexão total e dois para conexão parcial, alterando deste modo o número de conectores. Assim, de modo a formar a viga, une-se dois perfis C240x2.5 alma com alma através de parafusos autoperfurantes (DIN7504K Aço G500A), sendo que em dois deles será ainda utilizado um perfil C140x2.0 no banzo inferior, maximizando o momento de inércia. A variação dos parâmetros espessura, profundidade e disposição dos conectores, influência o modos de rotura e a capacidade resistente de corte longitudinal das lajes mistas, sendo esta a base deste estudo.(Bai et al, 2019)

Por fim, sendo um tipo de solução em fase prematura, procura-se perceber se é possível correlacionar para as já existentes normas o tipo de análise a efetuar, elástica ou plástica que traduzirá melhor o comportamento obtido destes materiais.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos:

No capítulo 1 é introduzido o estudo, são feitas as considerações gerais, referência histórica e apresentam-se os objetivos.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde é feita uma análise de trabalhos realizados na área desta dissertação, sendo alguns destes trabalhos focados nos componentes individuais: aço enformado, conectores, betão, e outros englobam a laje mista na sua totalidade, com o intuito de perceber as vantagens e desvantagens da utilização das lajes mistas. São

também apresentados o comportamento estrutural do betão leve, sendo este comparado com o betão de densidade comum.

No capítulo 3 é apresentada as metodologias de cálculo previstas nas normas, EN 1992-1-1, EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 e EN 1994-1-1.

No capítulo 4 encontra-se dividido em duas partes, sendo a primeira correspondente ao descrito de todo o procedimento experimental, configurações dos provetes, instrumentação e os ensaios realizados ao passo que na segunda parte corresponde às propriedades do aço enformado a frio e do betão leve.

No capítulo 5 são apresentados e comentados os resultados obtidos experimentalmente para as lajes mistas aço enformado a frio-betão leve à temperatura ambiente. Apresentam-se as curvas força-extensão, deslocamentos verticais, horizontais e relativos e rotação longitudinal e transversal, sendo expostos os modos de rotura.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões deste trabalho, sendo também apresentados possíveis trabalhos futuros em lajes mistas de aço enformado a frio- betão leve inovadoras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Trabalhos prévios

2.1.1 Chapa

As lajes mistas são um dos mais comuns sistemas de piso em edifícios em aço. São compostos por chapas em aço e por betão estrutural (Figura 2.1, a)), que após adquirir cura trabalham como um só. Neste sistema, o desempenho na interface do aço-betão é transmitido a partir de tensões de corte longitudinal, fundamentais para garantir uma boa interação dos materiais. Assim, foram criados onze provetes com o intuito perceber o comportamento e estimar a capacidade de corte longitudinal de laje mista (Figura 2.1, b) e c)) com varões de aço longitudinais adicionais pelo método m-k. Verificou-se que ocorreram fenómenos de encurvadura. Ocorreu esmagamento da chapa na zona dos conectores, que se traduziu em escorregamento longitudinal (Grossi et al, 2015)



a) b) c)
Figura 2.1 – a) Componentes da laje mista com varões adicionais, b) Fissuras devido a momento fletor, c) Escorregamento longitudinal (Grossi et al, 2015)

2.1.2 Conectores

Foram criadas três soluções inovadoras de conectores, sendo no total 12 ensaios, (Mustapha Muhammad Lawan et al,2016) e testados experimentalmente, de acordo como o Eurocódigo 4. Verificou-se o nível de ductilidade e resistência das três soluções tendo como base a comparação da ductilidade e resistência com três soluções diferentes de conectores, duas delas, SBSC, DBSC (Figura 2.2, a) e b)) construídas utilizando parte da alma e banzo de um perfil C, e a outra solução HPSC (Figura 2.2, c)), utilizando perfil em aço laminado a quente atravessados por um parafuso M16. Verificou-se que todos os provetes apresentaram muito boa capacidade de deformação, tendo-se observado fissuras transversais junto do conector para cargas de 130 a 170KN, que resultou numa rotação inicial dos conectores causando uma pequena diminuição da carga aplicada. Porém, os conectores foram capazes de suportar carga em regime plástico, tendo-se atingido rotura devido ao excesso de deformação ou devido ao esmagamento do betão. Verificou-se também que as espécies com conectores DBSC apresentavam excessiva separação entre o betão e a chapa provocada pela grande área, no caso do dobro comparado para as espécies SBSC. Por fim, o tipo de conexão proposto revelou-se eficaz, com capacidade resistente superior aos conectores tradicionais de cabeça, quando comparado com outras investigações efetuadas de acordo com o Eurocódigo 4. (Mustapha Muhammad Lawan et al,2016.)

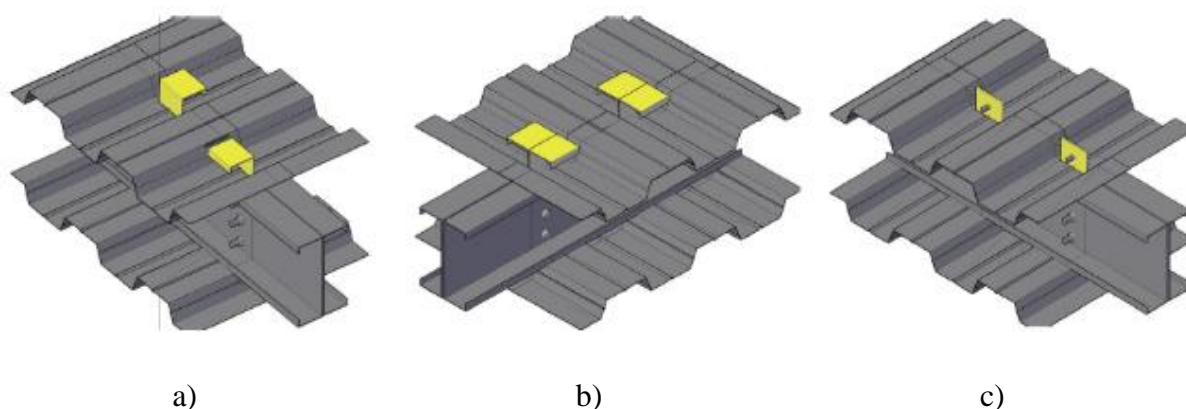


Figura 2.2 – a) Conector Simples (SBSC), b) Conector Duplo (DBSC), c) Conector de perfil laminado a quente (HPSC) (Mustapha Muhammad Lawan et al,2016.)

Em (Rosli et al,2015) pretendia-se estudar uma viga mista com perfis CFS e conexão aparafusada. Assim, foram criados quatro provetes de “push-out” de modo a estudar a ligação em questão sendo complementadas por 2 provetes à escala real da viga mista. Verificou-se que os resultados de carga limite e de momento fletor em estado limite último foram significativamente melhorados. Este ensaio permitiu classificar a ligação aparafusada dos

conectores como dúctil, uma vez ter apresentado capacidade de deslizamento superior a 6mm, como limite proposto no Eurocódigo 4. A conceção de vigas mistas utilizando aço enformado a frio respeita a compatibilidade da ligação aço enformado a frio e ligação aparafusada, tendo-se verificado grande exatidão entre o ensaio experimental e os cálculos teóricos dos ensaios aos conectores, para estado limite último de momento fletor e para esforço transversal. No final dos ensaios procedeu-se a destruição de parte dos provetes (Figura 2.3, c) de modo a verificar a deformação dos conectores, a qual foi inexistente. Por fim, conclui-se que a análise plástica prescrita pelo Eurocódigo 4 é válida para determinar o momento fletor resistente.

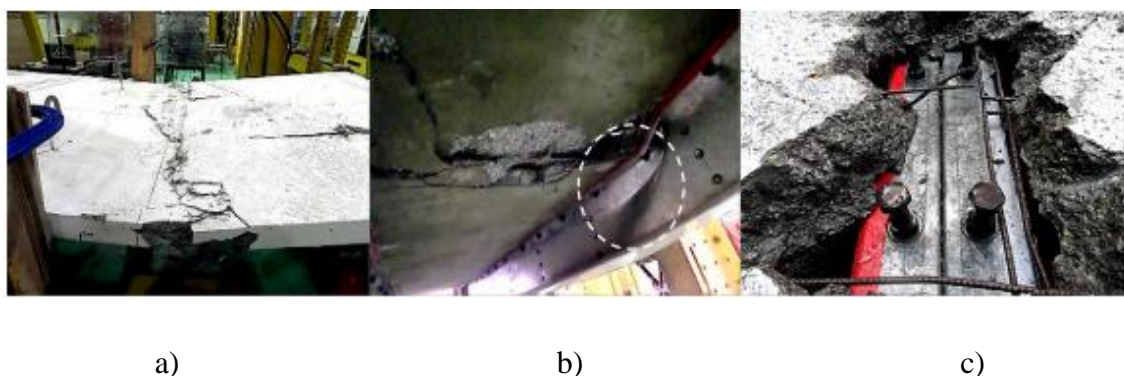


Figura 2.3 – a) Esmagamento do betão, b) Esmagamento da alma c) Verificação do estado dos conectores (Rosli et al,2015)

2.1.3 Viga mista

A aplicação de aço enformado a frio como membro estrutural está numa fase muito prematura devido informação técnica limitada disponível, apesar das perspetivas e potencialidades da sua utilização. Deste modo foram ensaiadas nove espécies de vigas mistas, (M. M. Lawan et al, 2020) variando a dimensão do conector. Em todas elas, a conexão aparafusada mostrou boas capacidades de resistência ao estado limite último, carga última, verificando-se que foram eficazes a transferir o esforço de corte longitudinal entre a laje de betão e os perfis em aço enformado a frio, tendo sido o modo de rotura obtido para estado limite último de momento fletor (Figura 2.4, a) e b)). Dos três tipos de conectores, os parafusos M16 apresentaram a carga limite última mais alta, seguindo-se os parafusos M14 e por último os parafusos M12. Assim, e de acordo com o estudo realizado, verifica-se que os perfis em aço enformado a frio podem ser utilizados como membros estruturais para construções de pequeno e médio porte.



Figura 2.4 – a) Encurvadura por esforço transverso, b) Esmagamento do betão (M. M. Lawan et al,2020)

Neste caso, procedeu-se à união de dois perfis em C, formando uma viga em I (Figura 2.5, a)), tendo sido utilizados os conectores SBSC, DBSC e HPSC (S. O. Bamaga et al,2019). Os modos de rotura foram semelhantes em todos os oito provetes, tendo surgido inicialmente fissura nas zonas de aplicação da carga sendo posteriormente seguidas por fissuras de esforço transverso. Fissuras longitudinais formaram-se ao longo da viga, porém não representaram os modos de rotura do provete. Verificou-se que os valores obtidos teoricamente foram validados com elevado grau de correspondência pelos ensaios experimentais, nomeadamente na capacidade resistente de estado limite último de momento fletor, ficando provado que o dimensionamento pelo Eurocódigo 4 para análise plástica é válido. Já em condições de serviço, a flecha obtida apresentou valores inferiores aos previstos, sendo os provetes com os conectores DBSC a apresentarem maior capacidade resistente de estado limite último de momento fletor (S O Bamaga et al,2019).

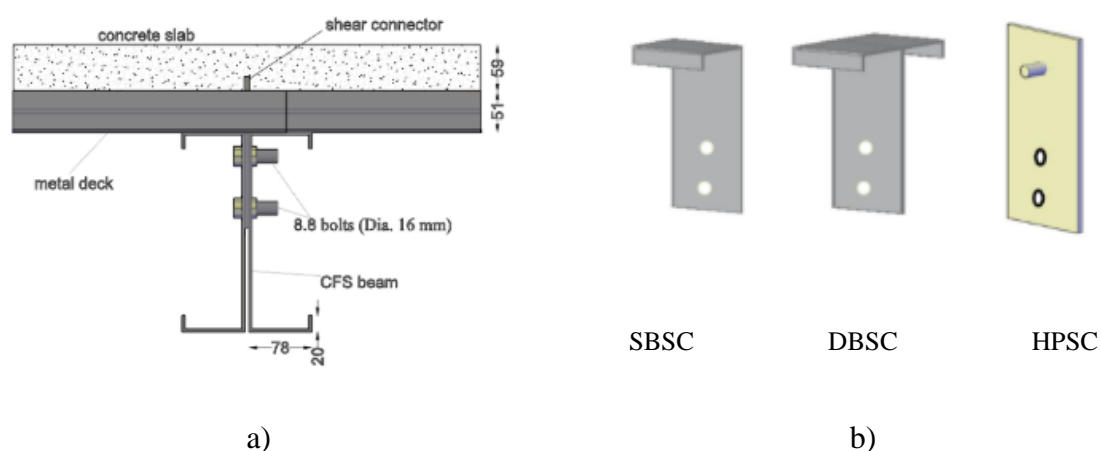


Figura 2.5 – a) Secção transversal proposta, b) Tipos de conectores (SBSC), (DBSC), (HPSC) (S O Bamaga et al,2019)

Um sistema de viga mista pré-fabricada com formato em U foi proposto e criado de modo a estudar a ação entre as secções em aço enformado a frio e a laje em betão. Os resultados mostraram que o aumento do número de camadas de malha de aço e a espessura dos perfis contribuíram significativamente para a capacidade de carga última das secções mistas, além de que diminuiu significativamente a quantidade de fissuras existentes. Os modos de rotura foram significativamente diferentes. Nos provetes com perfis enformados a frio com 3 mm e 4 mm, ocorreu esmagamento do betão, ao passo que nos provetes com 2 mm ocorreram fenómenos de encurvadura nos perfis. Ainda assim, o colapso deveu-se por atingir a capacidade de momento fletor resistente. Após realização dos ensaios procedeu-se a demolição de parte dos provetes (Figura 2.6) com objetivo de verificar o estado dos conectores, verificando-se que estes, conectores aparafusados M12 não sofreram deformação. Por último, verifica-se que o dimensionamento das vigas mistas pelo Eurocódigo 4 pode ser eficientemente calculado pela análise plástica. (Alhajri et al, 2016)

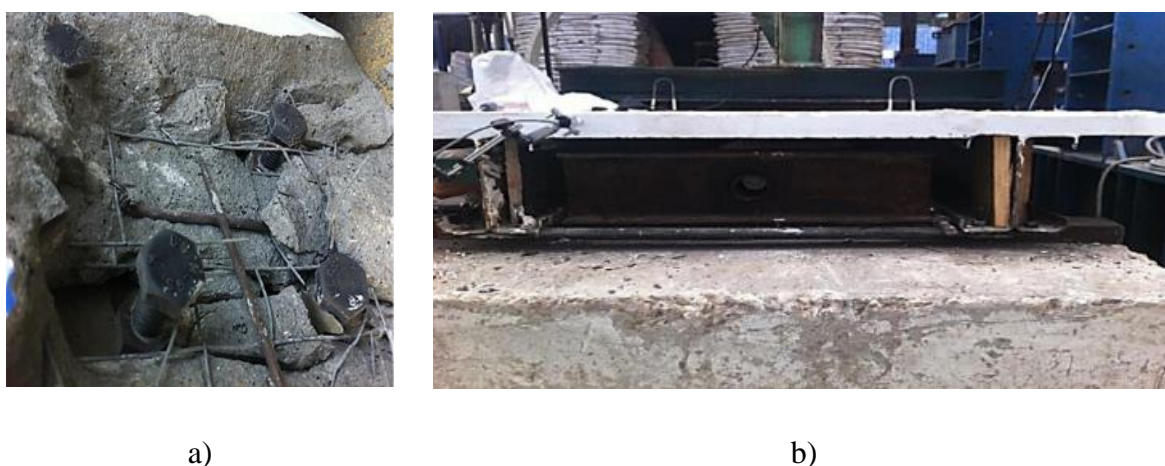


Figura 2.6 – a) Verificação do estado dos conectores, b) Vista transversal do provete (Alhajri et al, 2016)

A construção mista é uma excelente opção para minimizar, ou até mesmo prevenir fenómenos de encurvadura no banzo superior comprimido das secções da viga. Isto pode ser feito adicionando uma laje de betão a uma viga de elementos em CFS através de conectores de corte longitudinal. Fazendo isto, alteramos a posição do eixo neutro da viga, migrando este para a parte superior de modo que o banzo superior da viga em CFS sofra menos tensões de compressão, ou se possível colocar toda a secção de aço à tração, encontrando-se assim o eixo neutro na parte do betão. Além disso, o sistema viga mista aumenta significativamente a capacidade resistente e a rigidez, quando comparado com uma viga simples. Os conectores devem ser distribuídos ao longo da viga, visto estes conectores criarem uma ligação robusta entre a laje e as vigas em aço CFS. Devido é pouca espessura das secções CFS, a utilização de conectores soldados fica afastada. Assim, é necessário criar uma nova solução de conexão. (M. M. Lawan et al, 2016)

2.2 Processo de fabrico do aço enformado a frio

2.2.1 Perfis e chapa

As secções em CFS são um dos mais eficiente e económicos membros das estruturas. O material bruto chega à fábrica já galvanizado e com a largura correta. O processo de desenrolar é rápido, sendo que as secções são automaticamente moldadas e cortadas com o comprimento pré-definido nas máquinas laminagem a frio (*Cold-rolling*) (Figura 2.7), sendo designado por perfilagem. Neste processo é possível tanto criar perfis como moldar chapas, sendo que é possível criar secções com maiores comprimentos e de forma mais rápida. Os perfis são feitos à medida consoante a sua utilização, sendo posteriormente guardados de forma empilhada de modo a serem convenientemente manuseados e transportados. Estas características, tornam-se a razão pelo que estas secções são cada vez mais frequentemente e amplamente utilizadas na construção. (Bryan, 1988)



Figura 2.7 – Perfiladora (algoro@, 2020)

A quinagem (pressing brake) (Figura 2.8) é utilizada para produção reduzida e secções com geometrias diferentes. Passa por colocar uma chapa com dimensões já definidas na quinadeira, prensando-a de forma a obter uma peça pretendida (Figura 2.8). Apesar de ser uma boa solução para criar peças com perfis mais irregulares, tem as suas limitações, nomeadamente, ao comprimento e quantidade de peças criadas.

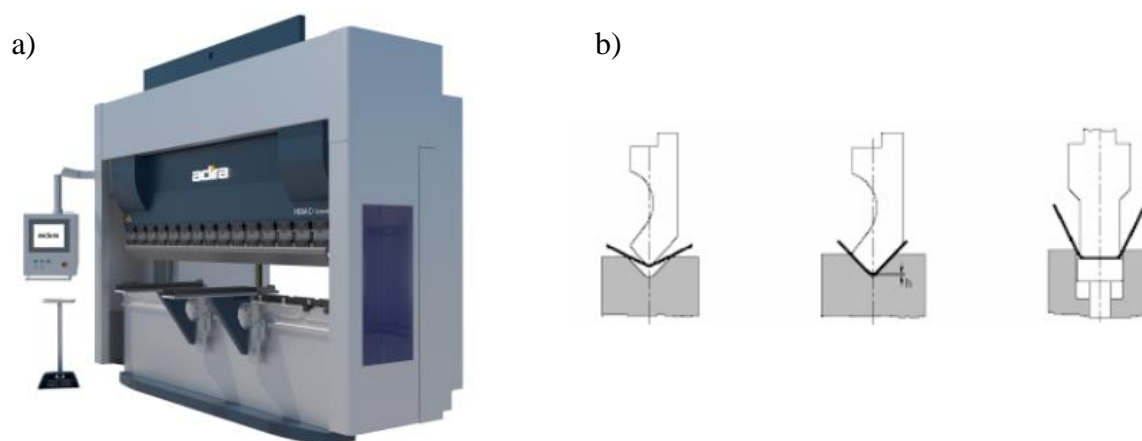


Figura 2.8 – a) Quinadora de moldagem de AEF (ferrol2industria@) e b) Processo de quinagem (Arsedys@)

Destes dois processos resultam dois grupos de secções em AEF, perfis e chapas perfiladas.

Os perfis (Figura 2.9), apresentam várias configurações geométricas que permitem criar secções compostas fechadas ou secções compostas abertas.

As chapas perfiladas (Figura 2.10), são elementos com menor espessura, frequentemente utilizados em fachadas, coberturas ou como chapa colaborante.

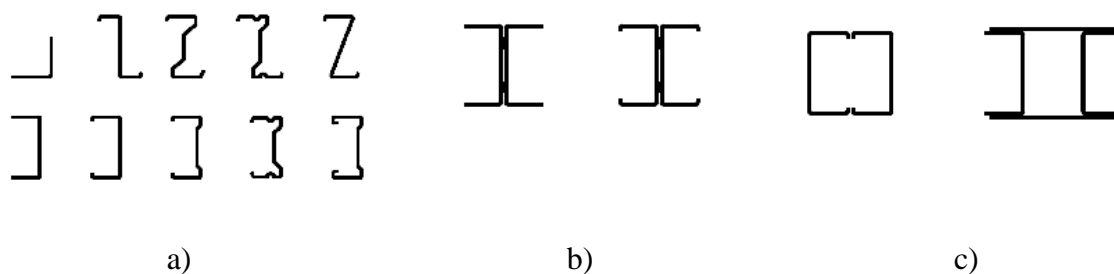


Figura 2.9 – Secções típicas utilizadas com perfis em aço enformado a frio, a) Perfis, b) Formação de secções abertas, c) Formação de secções fechadas (EC4)

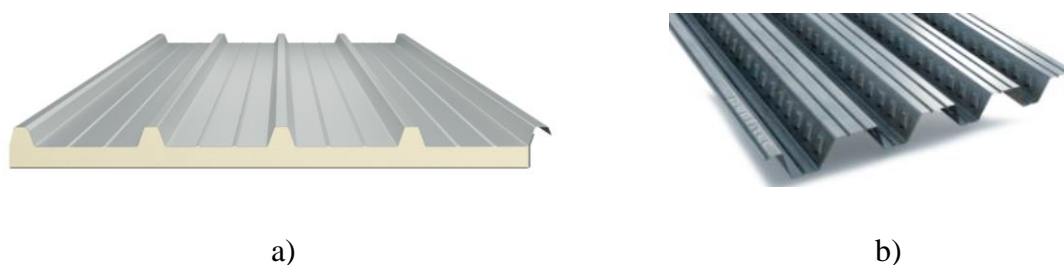


Figura 2.10 – a) Chapa de cobertura (ofeliz@), b) Chapa perfilada colaborante (Perfitec@)

2.2.2 Vantagens e Desvantagens do aço enformado a frio

Existem muitas razões para a utilização do aço enformado a frio durante a sua utilização na construção. Este é considerado como um super material de construção, com bastantes benefícios para o construtor e para o consumidor, tais como:

- Apresenta uma relação custo/benefício elevada para edifícios de altura média.
- Rápida montagem e facilidade de construções complexas com elevada relação resistência/ peso próprio.
- É um material 100% reciclável.
- À semelhança do aço laminado a quente, é um material com qualidade e consistência previsíveis, porém tem a particularidade de ser economicamente mais viável para cargas menores, devido à sua reduzida espessura.
- Elevada disponibilidade de criação de secções com diferentes características, devido à facilidade com este é criado;
- A montagem das chapas cria uma plataforma de trabalho segura para trabalhadores e equipamentos;
- Reduzido tempo de construção devido ao facto de as tarefas na laje não necessitarem de a laje estar concluída;
- Redução da quantidade de armadura, sendo necessária apenas armadura mínima para evitar fendilhação e armadura nas zonas de momento negativo;
- A capacidade de suportar o peso do betão fresco sem nenhum tipo de escora;

As principais desvantagens são:

- É necessário formar mão de obra especializada na área, uma vez que a sua aplicação no mercado ainda é recente.
- Apresenta baixa resistência ao fogo, quando comparado com o aço laminado a quente, devido ao elevado coeficiente de transmissibilidade de temperatura e à secção reduzida, pelo que os custos de proteção são mais elevados.

- As secções em aço enformado a frio apresentam elevada suscetibilidade a fenómenos de encurvadura local, global e distorcional.

2.2.3 Imperfeições geométricas

A espessura das secções em aço enformado a frio é bastante reduzida, sendo, portanto, a capacidade resistente última e capacidade de encurvadura bastante sensíveis às imperfeições iniciais. (Schafer and Peköz, 1998) analisaram dois tipos de imperfeições geométricas, tipo 1, d_1 máxima imperfeição local na alma e tipo 2, d_2 , máximo desvio observado nos banzos com reforço de extremidade (Figura 2.11) num perfil de secção em C. Estes autores, concluíram que para as imperfeições máxima locais do tipo 1 (d_1), a relação comprimento/espessura (w/t) apresentavam valores inferiores a 200, e para as imperfeições máximas locais do tipo 2 (d_2) esta relação apresentava valores inferiores a 100. Estas conclusões são apenas válidas para secções com espessura inferior a 3mm, obtendo-se uma aproximação do comprimento (w) para $d_1 \approx 0.006w$ e $d_2 \approx t$.

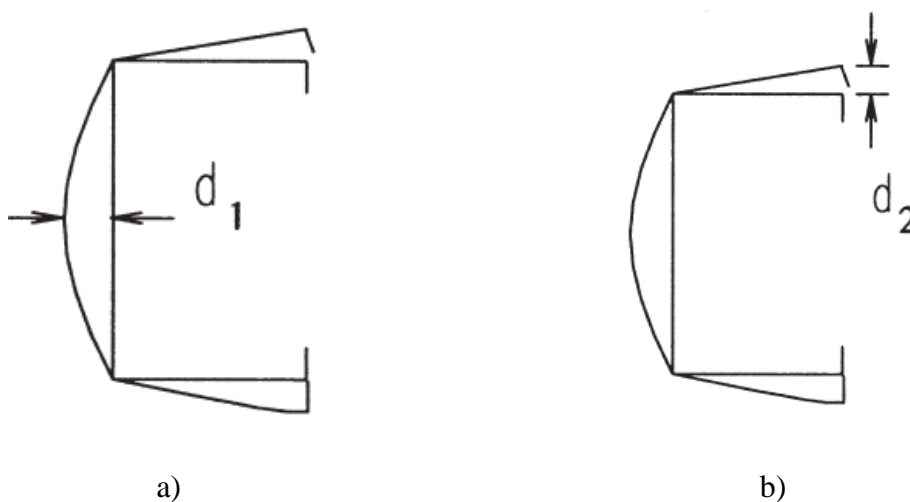


Figura 2.11 Imperfeições geométricas. a) Imperfeições na alma, b) Imperfeições nos banzos (Schafer and Peköz, 1998)

2.2.4 Tensões residuais

As tensões residuais instalam-se nas secções em aço enformado a frio durante o processo de fabrico (quinagem ou perfilagem) e do processo de enrolamento e desenrolamento dos rolos, condicionando a capacidade de carga e resistência dos elementos. Já nos perfis laminados a quente, este processo ocorre devido ao arrefecimento do perfil, uma vez que o arrefecimento ocorre de fora para dentro. As tensões introduzidas dividem-se em dois tipos, tensões de membrana

(Figura 2.12), constante ao longo da secção e tensões de flexão, variam consoante a espessura (Figura 2.12). As tensões de membrana estão associadas à capacidade axial da peça, mantendo uma tensão constante ao longo desta, sendo que as tensões de flexão variam consoante seja no banzo ou na alma. (Díaz e Cuesta, 2021.) Desta experiência, concluíram que as tensões de membrana são relativamente menores quando compradas com as tensões residuais de flexão, mais comuns em aços laminados a quente. Além deste ponto, as tensões residuais de flexão, apresentam também valores de resistência superiores nos cantos, isto pelo facto de estes se encontrarem em regime plástico, (Figura 2.13, b)) à qual estes picos de tensão não devem ser contabilizados no dimensionamento.

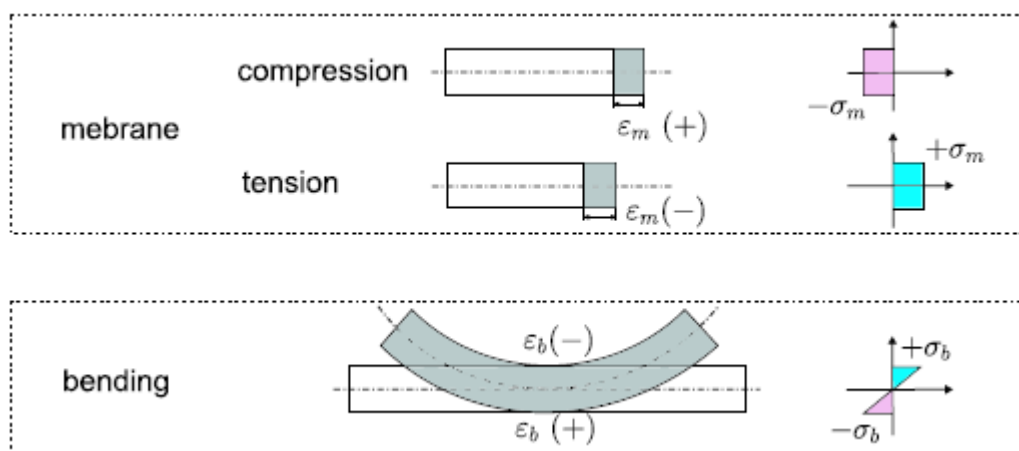


Figura 2.12 Definição das tensões residuais de membrana e flexão. (Díaz e Cuesta, 2021)

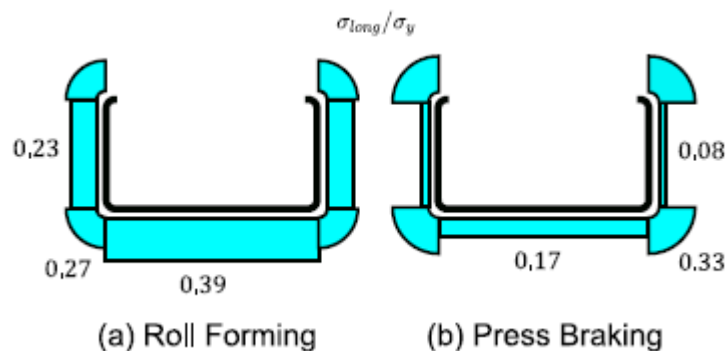


Figura 2.13 Tensão residual de flexão. a) Perfilagem. b) Quinagem. (Díaz e Cuesta, 2021)

2.3 Betão Leve

O betão é uma mistura de cimento, água e agregados de variadas dimensões, sendo este o maior constituinte do betão. Assim, qualquer redução seja de peso ou de impacto ambiente, terá consequências positivas enormes. É então que surge o betão leve, composto por agregados com

peso próprio inferior ao de agregado normal, podendo ser produzido a partir de argila expandida, poliestireno expandido, grânulos de plástico, entre outros. Por outro lado, apresenta porosidade superior, pelo que tem comportamento térmico mais eficiente.

Tratando-se de um material mais leve, é expectável que o volume total de material utilizado seja inferior, pelo que os trabalhos associados à utilização do betão leve quando comparado com o betão normal, sejam consequentemente menos dispendiosos.

Devido ao aumento do custo de matéria-prima e constante redução dos recursos naturais, é imperativo a procura e utilização de materiais renováveis como alternativa na indústria da construção. Agregados reutilizáveis e artificialmente criados, não só recebem nova vida, como reduzem a poluição ambiental a que estariam associados. (Kan and Demirboğa, 2009)

(Vijayalakshmi and Ramanagopal, 2018.), estudaram betão leve em particular com agregado de argila expandida e concluíram que agregados com menos 16-46% de peso próprio, aos 28 dias o valor de resistência última variava de 23-60 MPa, valores que correspondem aos betões mais correntemente utilizados na construção com densidades que variavam de 1290-2044 Kg/m³.

Empresas com a betão Liz (UniLeve Estrutural), apresentam betão leve na classe LC8/9 a LC35/38, em que o comportamento do betão leve é bastante semelhante ao betão de densidade normal, variando apenas as suas propriedades.

3 NORMAS E DIMENSIONAMENTO

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais regras seguidas para análise e dimensionamento de uma viga mista aço leve e betão leve, com base nos Eurocódigos 2, 3 e 4, referente a estruturas em betão, estruturas em aço leve e estruturas mistas, respetivamente.

3.2 Betão leve

3.2.1 Generalidades

O Eurocódigo 2 destina-se ao projeto de estruturas em betão, sendo dispostos os princípios e os requisitos de segurança, de utilização e durabilidade da estrutura de betão, assim como a sua resistência. Nesta dissertação recorreu-se a esta norma para análise das características do betão leve. O capítulo 11 é dedicado ao betão leve.

3.2.2 Resistência

De acordo com a EN 206-1, a tensão de rotura do betão à compressão é obtida com o valor característico (quantilho de 5%) da resistência à compressão de provetes cilíndricos, f_{ck} ou provetes cúbicos, $f_{ck,cube}$. As classes de resistência baseiam-se no valor característico da resistência dos provetes cilíndricos, f_{ck} , determinado aos 28 dias.

Segundo EN 1992-1-1, 3.1, para betão normais, a massa volúmica está compreendida entre $2000\text{kN/m}^3 < \rho < 2500\text{kN/m}^3$ e para betões leves $\rho < 2000\text{kN/m}^3$. O módulo de elasticidade E_{lcm} do betão leve é obtido multiplicando o valor da elasticidade do betão normal pelo coeficiente η_E .

$$\eta_E = (\rho/2200)^2 \quad (1)$$

Em que:

- ρ é a massa volúmica

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^3 \quad (2)$$

$$E_{lcm} = \eta_E \cdot E_{cm} \quad (3)$$

3.3 Verificações segundo o Eurocódigo 3 (EN 1993)

3.3.1 Generalidades

O Eurocódigo 3 destina-se ao projeto de estruturas em aço, sendo na parte 1-3 dispostas as regras gerais para aço enformado a frio. Porém, em algumas cláusulas recorre-se ao Eurocódigo 3 parte 1-1 como forma de apoio.

3.3.2 Classificação das secções

No dimensionamento de elementos estruturais, deverá ser devidamente considerada a encurvadura local das suas secções, dada a influência deste fenómeno na sua resistência e capacidade de rotação. Na cláusula 5.5.2(1) da EN 1993-1-1 é feita a classificação das secções transversais dos elementos em quatro classe:

Classe 1: nas quais se pode formar uma rótula plástica, com capacidade necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência:

Classe 2: nas quais se pode formar momento plástico resistente, porém tem rotação limitada devido a encurvadura local.

Classe 3: secções em que a tensão na fibra extrema em compressão do membro estrutural em aço assume distribuição de tensões elástica, porém de encurvadura local pode evitar que o momento plástico resistente se atinga.

Classe 4: secções em que encurvadura local não permite que a tensão de cedência seja atingida numa ou mais partes.

As secções em aço enformado a frio são maioritariamente de classe 4. A classificação de uma secção é determinada recorrendo à relação entre o comprimento e a espessura dos componentes totalmente ou parcialmente comprimidos, sendo atribuída à secção a classificação mais desfavorável.

3.4 Verificação da alma

De modo a evitar esmagamento ou encurvadura na alma sujeita a uma reação ou outro tipo de força de corte aplicada, deve-se garantir que a capacidade resistente ao corte é superior à carga atuante. Segundo o eurocódigo 3-1-3, cláusula 6.1.7, essa verificação ocorre determinando a componente $R_{w,Rd}$.

Tratando-se de uma secção sem cutelos de reforço da alma, temos:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_5 k_6 \left[13.2 + 2.87 \sqrt{\frac{S_s}{t}} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (4)$$

Com:

$$K_5 = 1.49 - 0.53k \quad (5)$$

$$K_6 = 0.88 - 0.12t/1.9 \quad (6)$$

Em que:

t espessura

S_s É o comprimento de equivalente do apoio

A verificação da alma para esforço transversal, por se encontrar à compressão é tratada como secção de classe 4, pelo que a sua verificação é efetuada recorrendo ao EC3-1-3, cláusula 6.1.5:

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \emptyset} t f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (7)$$

Em que:

- f_{yb} é a resistência ao esforço transversal considerando encurvadura de acordo com (Figura 3.1);
- h_w é a altura correspondente à distância entre os dois banzos;
- \emptyset é o ângulo relativo entre os banzos e a alma.

Relative web slenderness	Web without stiffening at the support	Web with stiffening at the support ¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

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

Figura 3.1 Resistência ao esforço transversal com encurvadura f_{yb}

Para alma sem reforço transversal:

$$\bar{\lambda}_w = 0.346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \quad (8)$$

Em que:

- s_w é a distância correspondente à linha média dos banzos;
- E módulo de elasticidade do aço.

A verificação da encurvadura de esforço transversal é garantida se for verdadeira a seguinte expressão:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (9)$$

Com:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \quad (10)$$

Em que:

- η adota o valor de 1.20 para classes de aço até S460;

3.5 Dimensionamento segundo o Eurocódigo 4 (EN1994-1)

O EC4 é a norma relativa ao dimensionamento de estruturas mistas em aço e betão. O capítulo 6, é relativo aos estados limites últimos, no qual são apresentadas as fórmulas utilizadas para dimensionamento, assim como a verificação dos elementos pelo Eurocódigo 4.

3.5.1 Situações de dimensionamento – ações e efeitos das ações

Pela EN 1994-1 é necessário ter em atenção duas fases de projeto distintas. Segundo a cláusula 9.3 as fases construtiva e definitiva devem ser avaliadas individualmente para estados limites de serviço e estados limites últimos, devendo ser assegurada a segurança em ambas as fases.

Além de o Eurocódigo 4 fornecer as regras para o cálculo e dimensionamento de estruturas mistas aço betão, procedeu-se também à verificação da secção em aço pelo pressuposto no Eurocódigo 3.

3.5.2 Fase construtiva

As chapas perfiladas são utilizadas como cofragem, assim na fase construtiva é necessário verificar as chapas aos estados limites de serviço e estados limites últimos, devido ao peso próprio da chapa, do betão fresco, das sobrecargas de construção e no efeito de “poça”, que corresponde a um aumento da espessura de betão na zona de meio vão devido à deformação das chapas. Segundo a cláusula 9.3.2, se a flecha central (δ) for inferior a 1/10 da espessura da laje, pode ser ignorado o efeito poça, de outro modo é necessário considerar este efeito, admitindo-se no cálculo um acréscimo de espessura do betão ao longo de todo o vão de 0.7δ .

3.5.3 Fase definitiva

A partir do momento em que o betão ganha resistência suficiente, as ações a considerar são obtidas através da EN 1991-1-1.

Os estados limites de serviço no capítulo 7 do Eurocódigo 4 parte 1-1, sendo as deformações, e consequente flecha, fendilhação e vibração. Porém, no âmbito desta dissertação apenas se tem em conta as deformações.

3.5.4 Resistência ao corte longitudinal

O conceito de conexão total e conexão parcial apenas pode ser aplicada para vigas em estado plástico para cálculo da resistência ao momento e pontos críticos das secções.

Assim, uma laje mista apresenta conexão total quando aumentando a resistência ao esforço de corte longitudinal, não contribui para o aumento da resistência da laje à flexão, de outra maneira apresenta-se como laje mista com conexão parcial. As características dos conectores devem ser tidas em atenção de acordo com a EN 13918 (ISO 13918, 2015), mas sendo a viga em aço enformado a frio, não é possível utilizar conectores de cabeça com soldadura. Porém, o eurocódigo permite que a verificação de resistência dos conectores seja executada recorrendo às mesmas equações no caso de os conectores apresentarem características semelhantes. Assim, sendo utilizados parafusos com diâmetro, altura e resistência idêntica o dimensionamento é feito do mesmo modo que conectores de cabeça soldados.

No subcapítulo 9.7.4 do EC4 parte 1 é apresentado que os conectores devem ser dimensionados para uma força de corte igual à aplicada na chapa perfilada em estado limite último. A resistência $P_{pb,Rd}$ do conector, deve ser a menor da resistência de acordo com a cláusula 6.6.4.2.

$$P_{pb,Rd} = k_{\varphi} d_{do} t f_{yp,d} \quad (11)$$

Com:

$$k_{\varphi} = 1 + a/d_{do} \leq 6.0 \quad (12)$$

Em que:

- d_{do} é o diâmetro do cordão considerado 1,1 vezes o diâmetro do conector;
- a é a distância do centro do conector até ao rebordo da chapa;
- t é a espessura da chapa colaborante.

$$P_{Rd} = \frac{0.8 f_u \pi d^2 / 4}{\gamma_V} \quad (13)$$

$$P_{Rd} = \frac{0.29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_V} \quad (14)$$

Com:

$$\alpha = 1 \quad \text{para } h_{sc}/d > 4 \quad (15)$$

Em que:

- γ_V é o fator parcial, valor recomendado 1.25;
- d é o diâmetro do conector, entre 16mm e 25mm;
- f_u é a tensão última do material do conector, mas não superior a 500N/mm².
- f_{ck} é a característica da resistência da compressão do betão;

Segundo 6.6.4.2, (3) e (4), a resistência de corte deve ser multiplicada por um fator de redução dado por:

$$k_t = \frac{0.7 b_0}{\sqrt{n_r} h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (16)$$

Em que:

- n_r é o número de conectores em cada bossa da chapa colaborante, sendo o valor consultado em Figura 3.2.

Number of stud connectors per rib	Thickness t of sheet (mm)	Studs not exceeding 20 mm in diameter and welded through profiled steel sheeting	Profiled sheeting with holes and studs 19 mm or 22mm in diameter
$n_r = 1$	$\leq 1,0$	0,85	0,75
	$> 1,0$	1,0	0,75
$n_r = 2$	$\leq 1,0$	0,70	0,60
	$> 1,0$	0,8	0,60

Figura 3.2 Limites máximo do fator de redução k_t

Ao nível da superfície dos conectores, podem-se desenvolver superfícies de rotura no betão, pelo que a armadura de transverso é determinada de acordo com:

$$(A_{sf} f_{yd} / s_f) + (A_{pe} f_{yp,d}) > v_{ed} h_f / \cot \phi \quad (17)$$

Em que:

- A_{sf} / s_f é a armadura transversal por unidade de comprimento;
- A_{pe} é a área efetiva da secção da chapa colaborante por unidade de comprimento
- $f_{yp,d}$ é a capacidade resistente da chapa.

O grau de conexão de esforço de corte é dado pelo rácio $\eta = n/n_f$:

Para secções com banzos iguais, ou para secções em que o banzo tenha uma área igual ou inferior a três vezes a área do topo do banzo, recorre-se às seguintes equações:

$$L_e \leq 25: \quad \eta \geq 1 - \left(\frac{355}{f_y}\right) (0.75 - 0.03L_e, \eta \geq 0.4) \quad (18)$$

$$L_e > 25: \quad \eta \geq 1 \quad (19)$$

Em que:

- L_e é a distância, para vigas à flexão entre os pontos de momento igual a zero, em metros;
- n_f é o número de conectores para conexão total para o comprimento da viga em estudo;
- n é o número de conectores utilizados no mesmo comprimento.

A largura efetiva, para elementos simplesmente apoiados é dada pela seguinte expressão:

$$b_{eff} = b_0 + \Sigma b_{ei} \quad (20)$$

Em que:

- b_0 é a distância ao centro entre os conectores;
- b_{ei} é o valor efetivo da largura da laje de betão de cada lado da viga. Sendo uma viga simplesmente apoiada o valor é $L/4$;

A determinação da capacidade resistente à flexão, estando a laje sujeita a momento positivo é determinado

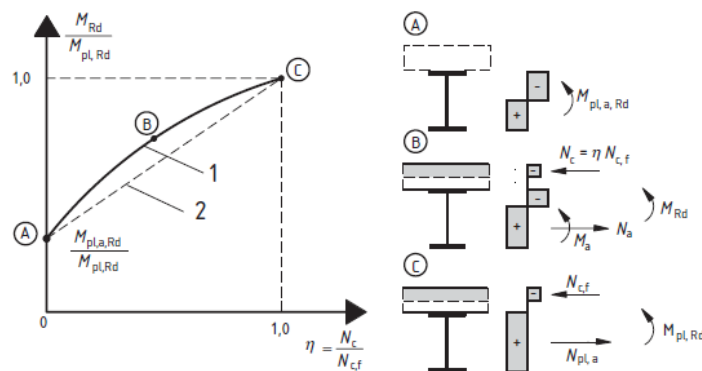


Figura 3.3 Relação entre o momento resistente e a força no betão (EC4)

$$M_{Rd} = M_{pl,a,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{pl,a,Rd}) \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (21)$$

Em que:

- $M_{pl,a,Rd}$ é o momento resistente da secção em aço
- N_c é a força de compressão no betão;
- N_{cf} é a força de compressão no betão com interação total;

3.5.5 Resistência ao fogo

A proteção ao fogo é dada pelo EC4 parte 1-2, no qual são abordadas as seguintes verificações, E(integridade), I(isolamento) e R (resistência mecânica).

Assim, e de acordo com a cláusula 4.3.2 do EC4-1-2, para lajes dimensionadas pelo EC4-1-1 sem proteção especial ao fogo, estas apresentam uma resistência ao fogo de pelo menos 30 minutos, critério R. No caso de se pretender prolongar este valor, será necessário recorrer a um ou a vários dos seguintes métodos:

- Colocação de armaduras adicionais dispostas longitudinalmente no interior das nervuras, obtendo assim proteção adicional pelo embebimento do betão;
- Adoção de proteções da face inferior, como tetos falsos, projeção de argamassa ou tinta intumescente;

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o trabalho experimental realizado para esta dissertação, em lajes mistas de aço enformado a frio e betão leve com quatro configurações distintas. Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento estrutural dos vários provetes, simplesmente apoiados à flexão, nomeadamente, o efeito da ação compósita e, a sua capacidade de carga e comparar os resultados experimentais com os valores obtidos a pelo Eurocódigo 4 parte 1-1.

Nas várias configurações realizadas, foram alterados dois parâmetros. O grau de conexão entre os perfis em AEF e o betão leve, nos quais dois provetes apresentavam conexão parcial, enquanto outros dois apresentavam conexão total. O segundo parâmetro estudado, refere-se à geometria da secção: dois provetes com a viga de secção simétrica e outros dois provetes com banzos de área diferente

4.2 Esquema dos ensaios

Na realização dos ensaios foi necessário criar um sistema de contraventamento que restringisse os movimentos horizontais, impedindo assim a ocorrência de fenómenos de encurvadura, que poderiam comprometer o estudo em questão (Figura 4.1). Os provetes foram submetidos a carga até à rotura, com velocidade constante de 0.01mm/s do atuar hidráulico, tendo as deformações e extensões sido medidas recorrendo a uma célula de carga no atuador hidráulico, extensómetros e LVDT's.



Figura 4.1 Sistema simplesmente apoiado com contraventamento lateral

Os provetes ensaiados consistem em perfis em AEF, de secções em C, chapa colaborante, ambos fornecidos pela empresa O Feliz, Figura 4.2, e betão leve fornecido pela empresa Betão Liz. Os ensaios decorreram no laboratório do ISISE no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

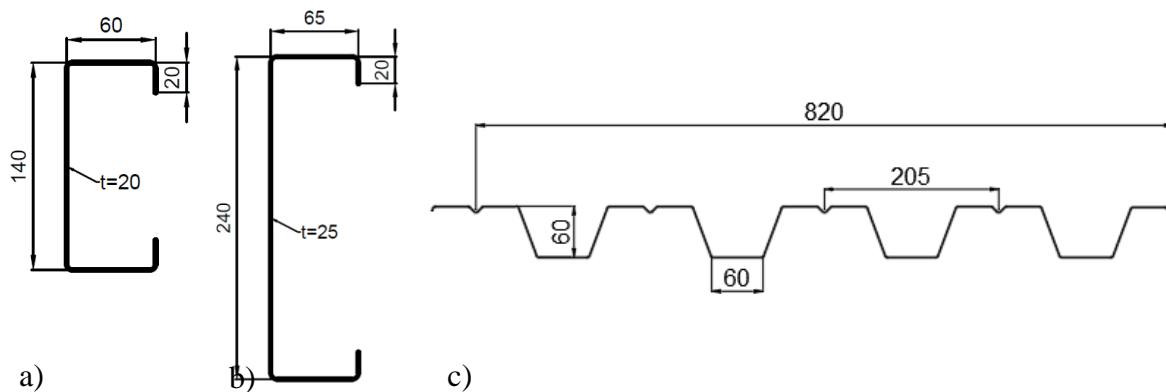


Figura 4.2 Perfis em AEF. a) Perfil C140. b) Perfil C240. c) Perfil H60

A classe do aço enformado a frio é S280SD, com uma proteção de Zinco (Z275) em ambas as faces, tendo os perfis C140 uma espessura nominal de 20 mm e os perfis 240 uma espessura nominal de 25 mm, sendo a espessura da camada de galvanização em Zinco de 0.04mm, de acordo com a EN 10346. (EN 10346)

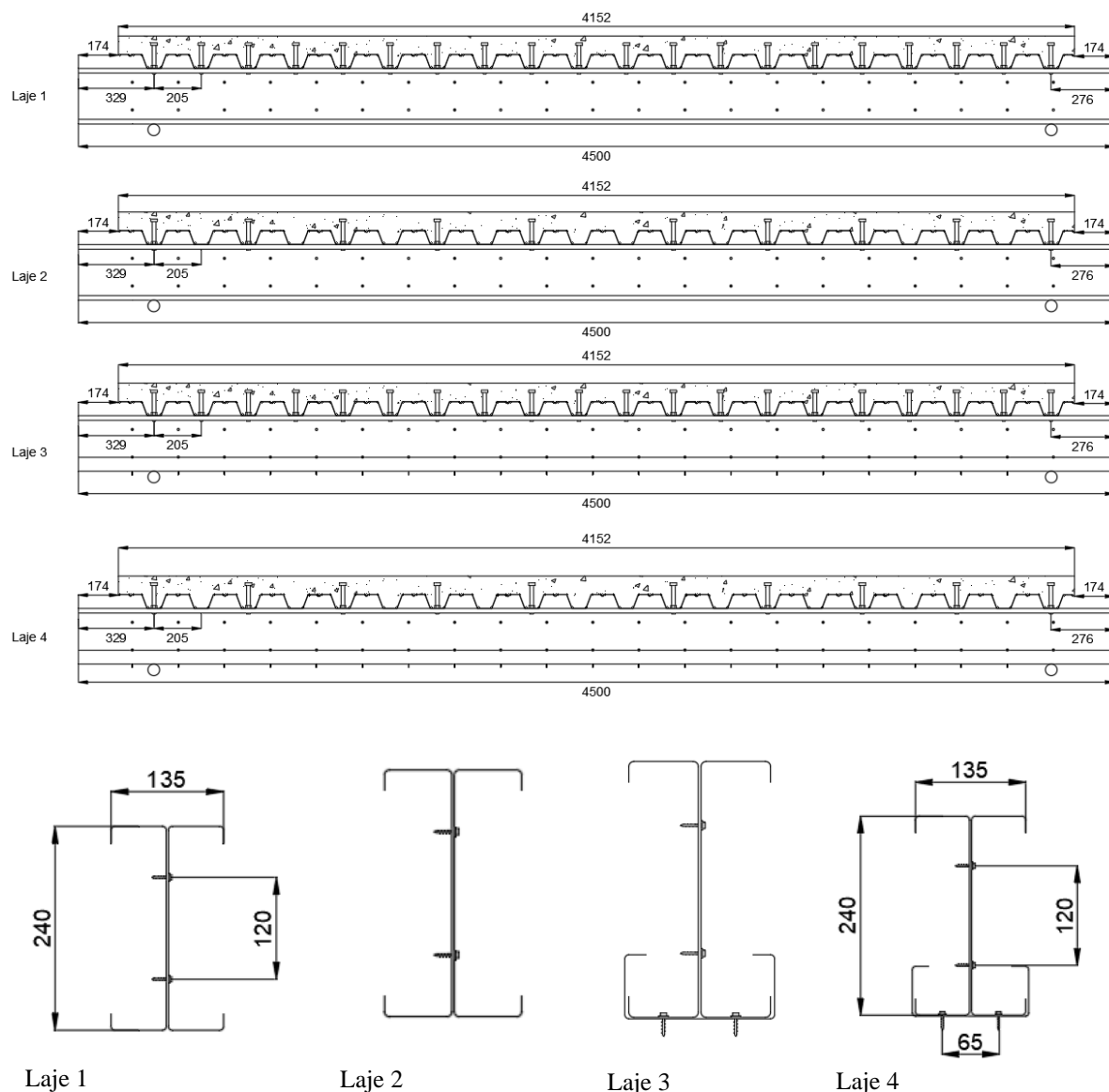


Figura 4.3 Configuração dos quatro provetes analisados (mm)

4.3 Montagem das lajes mistas

Os provetes ensaiados consistem em perfis em AEF, de secções em C, chapa colaborante, ambos fornecidos pela empresa O Feliz, e betão leve fornecido pela empresa Betão Liz. A ligação entre os perfis C de modo a formar uma secção em I, e a criar os banzos com áreas diferentes ocorreu recorrendo a parafusos de 6.3mm. Já a ligação das chapas aos perfis ocorreu recorrendo aos conectores M16, que por sua vez têm a função de conectar os perfis em aço e a laje em betão.

O processo de montagem das lajes mistas e criação dos layouts para realização dos ensaios foi dividido em várias fases, pela dimensão e complexidade dos provetes como pelo tempo de cura do betão $t=28$ dias. Assim, numa fase inicial começou-se por unir os perfis C240 de modo a criar a viga em I, no qual foi necessário fazer a marcação das distâncias (Figura 4.4, d) e e)). A simetria é um ponto crucial para que o comportamento seja o mais próximo possível de um perfil em I, deste modo foi necessário mobilizar os perfis com um serra junta, garantindo que as fibras mais afastadas de cada perfil estivessem sujeitas à maior tensão em situação de carga.

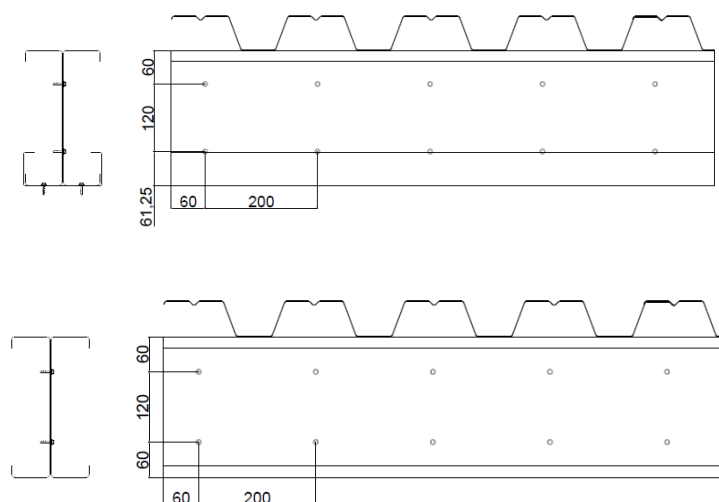
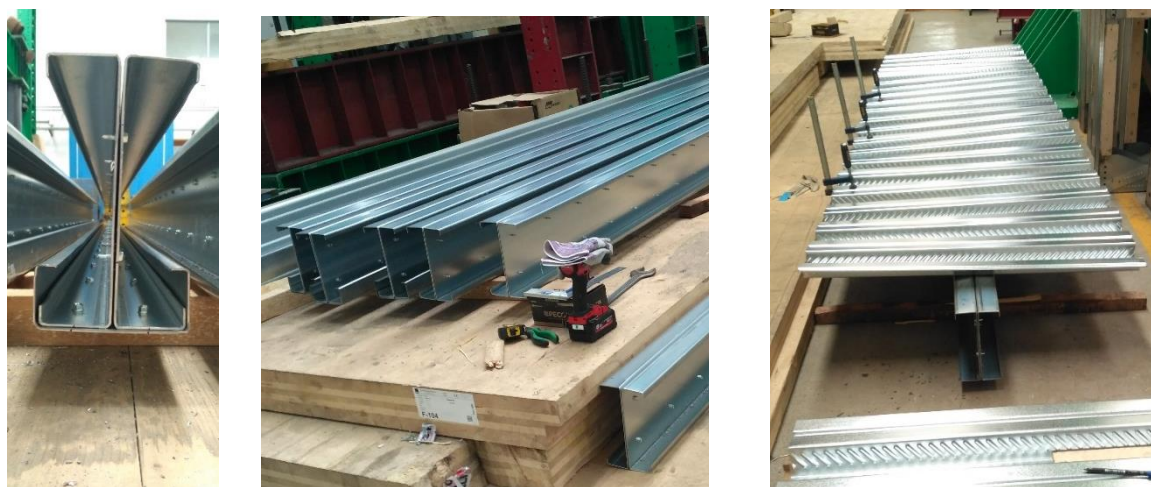


Figura 4.4 – a) e b) Montagem das vigas em AEF. c) Aplicação das chapas colaborantes. d) e e) Esquema de montagem com as distâncias a colocar os parafusos autoperfurantes.

Determinada a quantidade de chapas a utilizar por provete, cinco, o comprimento total é igual a 4152 mm, enquanto os perfis C240 e C140, apresentam 4500mm de comprimento (Figura 4.3). Assim, optou-se por colocar as extremidades das chapas afastadas cerca de 174mm da

extremidade. A horizontalidade das chapas foi garantida recorrendo a um nível de bolha enquanto as mesmas eram fixadas nas medidas corretas, sendo posteriormente aplicados os conectores. Estes foram aplicados com dupla porca e anilha (Figura 4.5. a)) de modo a evitar o esmagamento da chapa e do perfil C240, tendo sido o torque aplicado com uma chave dinamométrica de modo a garantir que todos os conectores teriam comportamento semelhante em situação de carga, tendo resultados nas configurações apresentadas em (Figura 4.5,b) e c)).

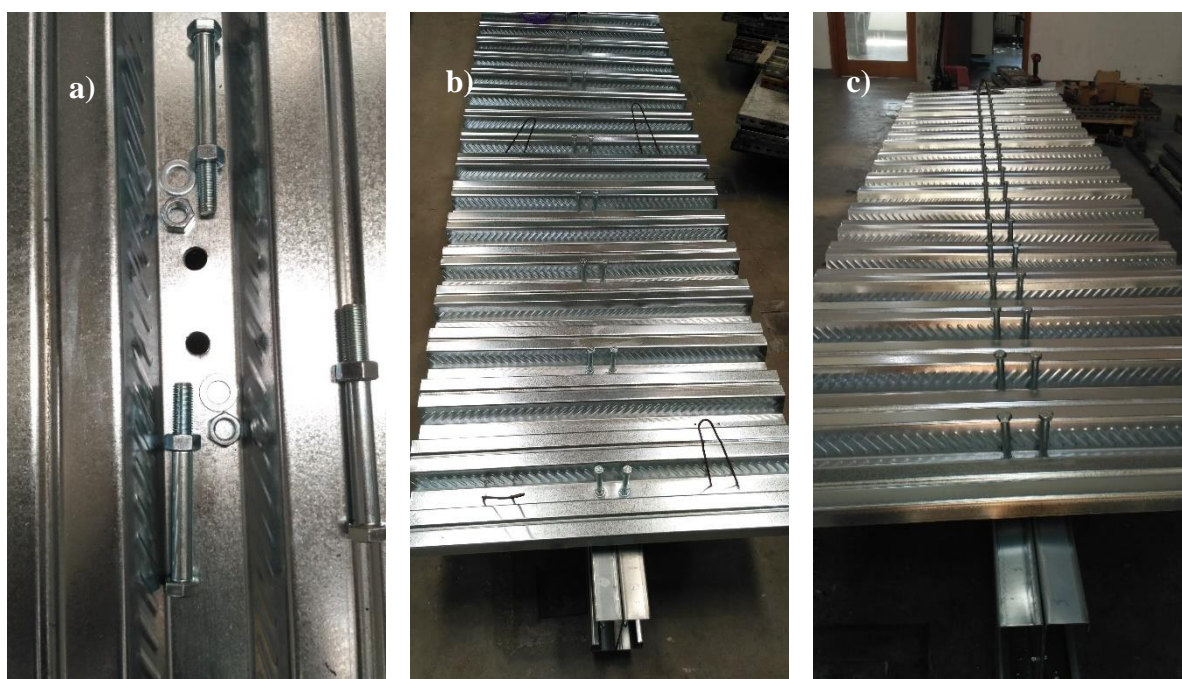


Figura 4.5 – a) Esquema de aplicação do conector. b) Laje mista de conexão parcial. c) Laje mista de conexão total

Para a betonagem foi necessário criar um sistema de suporte das lajes até então montadas (Figura 4.6, a)). Sendo a cofragem constituída por peças com duas dimensões, placas de 2m x 0.60m e placas com 1m x 0.60m, optou-se por elevar a laje cerca 210mm na zona central e cerca de 450mm na zona das chapas (Figura 4.6 c)). Todo este processo foi realizado de modo a garantir a segurança e estabilidade da cofragem, pelo que foi necessário fixar as placas garantindo a sua imobilização. Com isto, obteve-se uma superfície nivelada à face da cofragem para que fosse possível serrar o betão, garantindo que a altura da laje seria de 150mm. Após, aplicou-se a malha com secção quadrada 150mm x 150mm com varão de 6mm (Figura 4.6 c)).

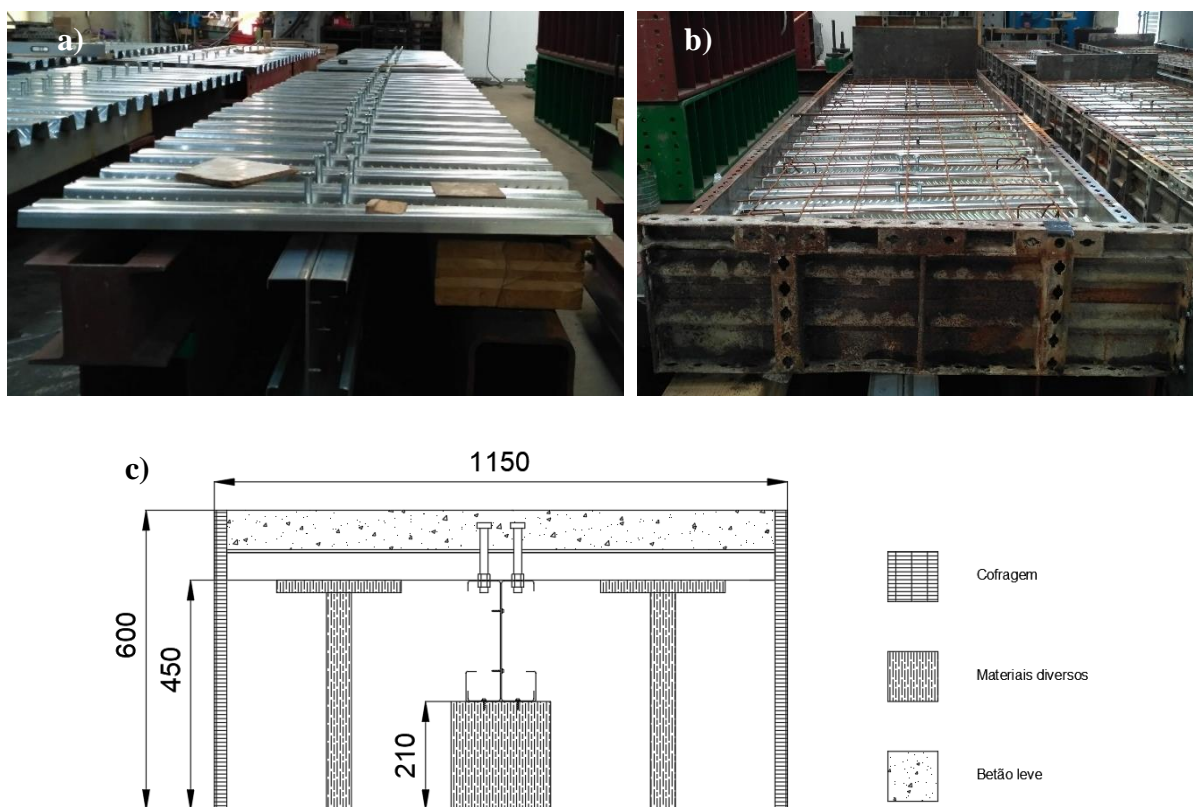


Figura 4.6 – a) Laje nivelada antes da cofragem. b) Laje com cofragem e armadura mínima e de flexão negativa. c) Esquema de preparação da cofragem.

Na betonagem, o betão foi descarregado de um camião de mistura para o balde de 0.3m^3 , sendo em depositado nas respetivas lajes (Figura 4.7, c) e d)). De seguida vibrou-se o betão utilizando um vibrador tecnoflex rabbit (Figura 4.7, a)), garantindo uma boa compactação do betão (Figura 4.7, e)). Por fim, de modo a proceder à determinação da resistência do betão foram retiradas amostras no início e final da betonagem (Figura 4.7, e) e f)) devidamente compactadas.

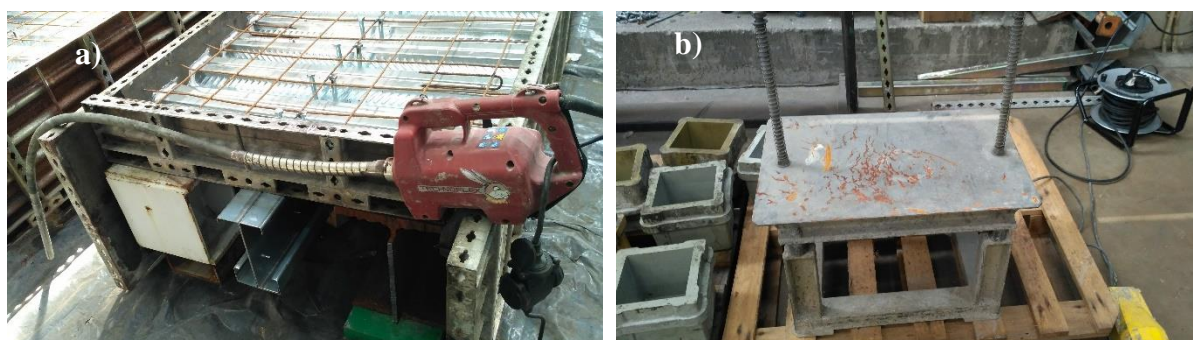




Figura 4.7 – a) Vibrador tecnoflex rabbit para betão. b) Placa vibratória. c) e d) Transporte e deposição do betão. e) Laje mista após betonagem. f) Provetes de betão

4.4 Instrumentação das lajes mistas

A instrumentação é um processo delicado, tanto pela sua aplicação como pelo valor económico dos extensómetros (Figura 4.8, b)), sendo que a aplicação incorreta incorre numa incorreta leitura dos dados e invalidação dos mesmos. Posto isto o procedimento adotado foi o seguinte:

Utilizando uma folha de lixa de água 240 começou por se desgastar a camada de zinco na zona da colagem do extensómetro (Figura 4.9, a), b)). De seguida removeram-se as impurezas presentes na superfície recorrendo a um cotonete com acetona. Estando a superfície limpa, segue-se a aplicação do extensómetro. Coloca-se fita-cola sobre o extensómetro e aplica-se parte sobre a superfície, sendo posteriormente aplicada cola de ciano acrilato (Figura 4.8,a)). O

extensómetro deve ficar devidamente alinhado com as medidas anteriormente confirmadas (Figura 4.9, c)). Após a devida secagem da cola, remove-se a fita cola e aplica-se a fita de isolamento (Figura 4.8, c)), na qual vão ser colocados as pontas dos cabos devidamente descarnados e estanhados aos extensómetros. Em seguida aplica-se fita adesiva, imobilizando os cabos de leitura, evitando suscetíveis vibrações possíveis de danificar os mesmos.



Ciano acrilato



Extensómetros



Fita de Isolamento

Figura 4.8 – a) Materiais utilizados na instrumentação



a)

b)

c)

d)

Figura 4.9 – Procedimento de colagem dos extensómetros

- a) Zona de aplicação dos extensómetros, b) Desgaste da camada de zinco, c) Aplicação dos Extensómetros, d) Aplicação da fita de isolamento, cabos de leitura e fita .

4.5 Montagem do Layout

A criação do layout foi ocorreu de modo a ensaiar lajes mistas à temperatura ambiente e lajes mistas ao fogo, pelo que foi necessário criar uma altura extra de cerca de 1300mm da laje de

piso de modo a adquirir espaço suficiente para comportar os fornos. Posto isto, e devido às dimensões em questão, 3900mm entre apoios (Figura 4.10,d)), a criação do layout exigiu significativa agilidade para a criação e montagem das peças. Assim, foi necessário proceder à montagem de um pórtico, o qual se instalou um atuador hidráulico com capacidade para 90ton e o respetivo ponto de distribuição da carga na laje mista (Figura 4.10, a) e b)), sendo posteriormente os dados obtidos pelos extensómetros e LVDT's monitorizados e gravados no computador. (Figura 4.10c)).

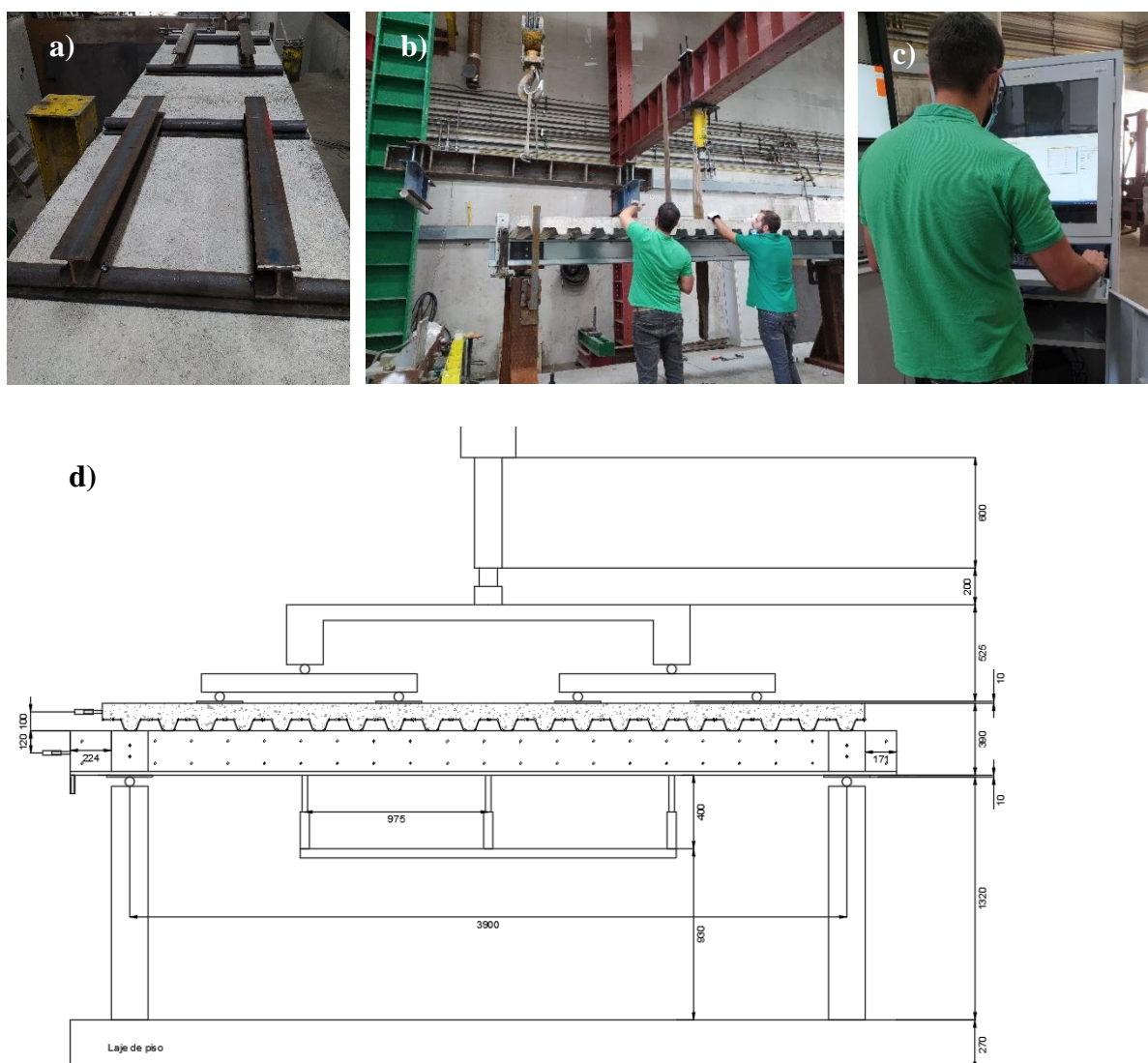


Figura 4.10 – a) e b) Montagem do layout, c) Monitorização dos dados, d) Esquema do layout com as medidas

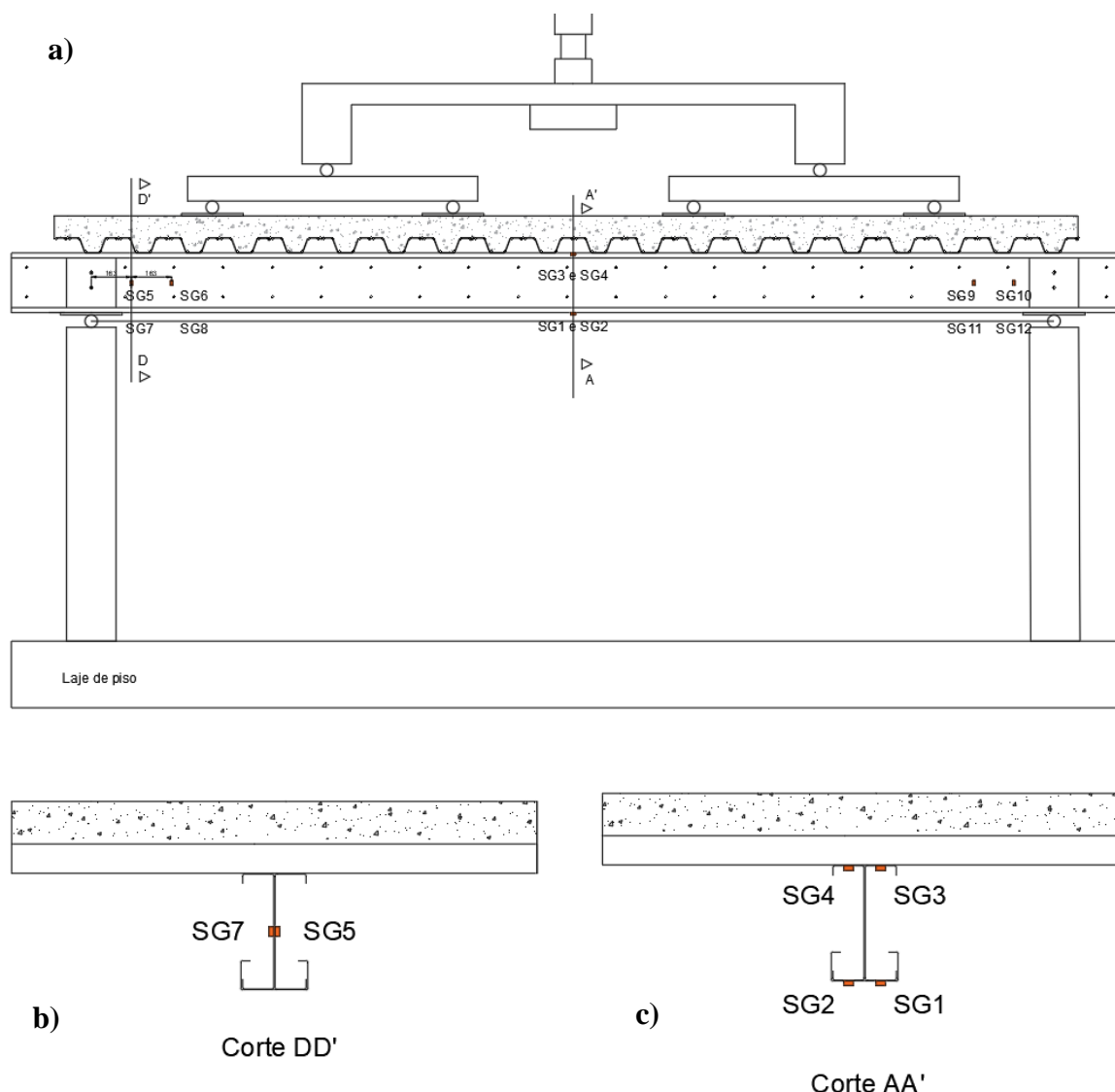


Figura 4.11 – a) Vista longitudinal da totalidade dos extensómetros, b) Vista transversal dos extensómetros na alma, c) Vista transversal dos extensómetros nos banzos

O esquema de montagem dos extensómetros, toma duas configurações (Figura 4.11a) e b). Na configuração (Figura 4.11 b) é apresentada a posição dos extensómetros de leitura do esforço transversal, enquanto em (Figura 4.11 c) é apresentada a configuração para ler as extensões no banzo inferior e superior.

Na (Figura 4.12) é apresentado o esquema de montagem dos LVDT's, sendo que os LVDT 1, LVDT 2, LVDT 3, LVDT 4, LVDT 11 e LVDT 12 medem os deslocamentos verticais. Os LVDT 7 e LVDT 10 medem o deslocamento relativo entre o perfil em aço e a laje de betão. Os LVDT 5 e LVDT 8 medem as rotações e os LVDT 6, LVDT 8 LVDT 13 medem deslocamentos horizontais.

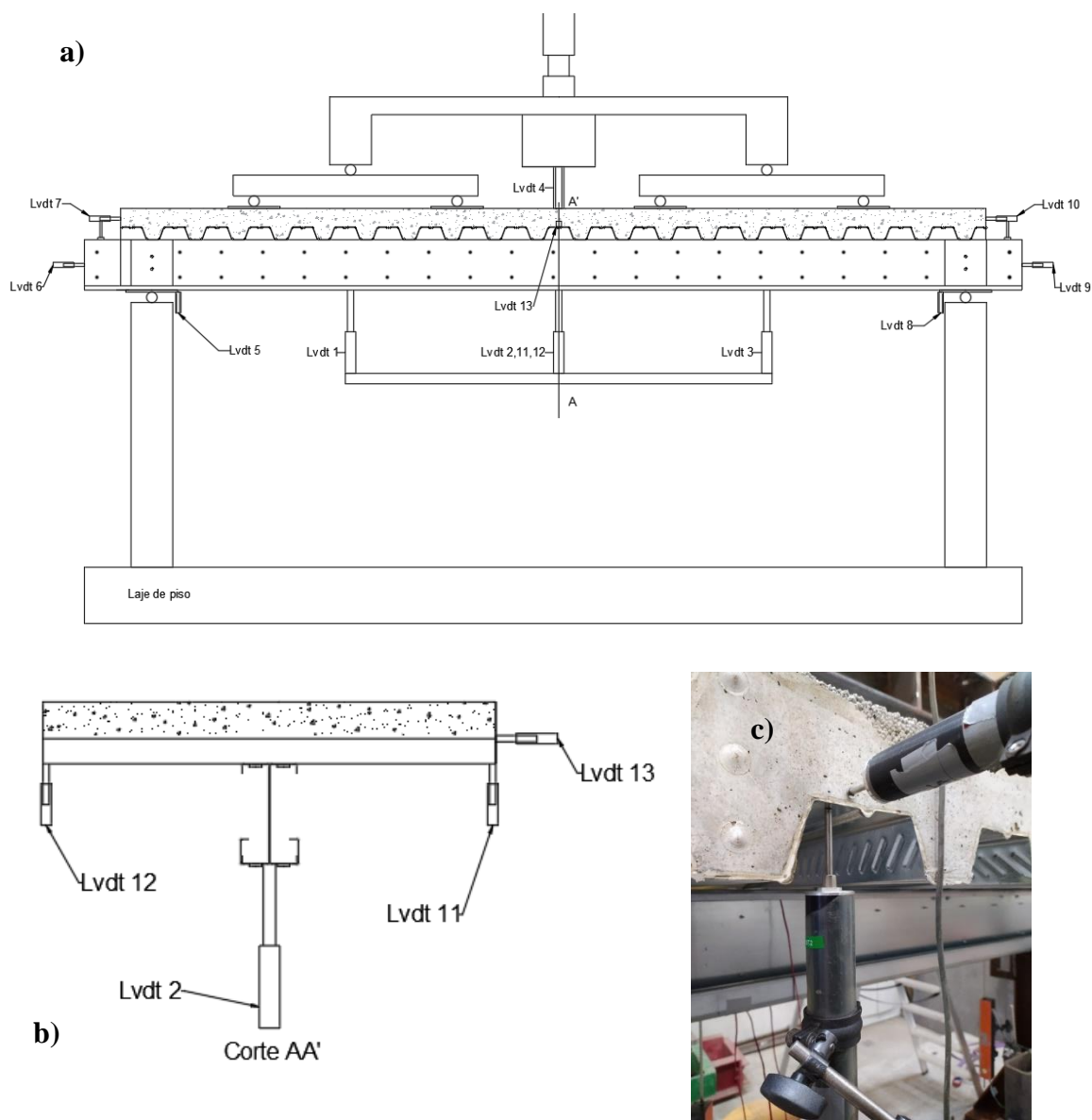


Figura 4.12 – a) Esquema da posição dos LVDT's, b) Vista transversal da secção de meio vão dos LVDT's, c) Pormenor dos LVDT's 11 e 13

4.6 Características dos materiais

As propriedades dos materiais utilizados foram obtidas experimentalmente no laboratório, tendo sido os ensaios de betão realizados à compressão de acordo com a norma EN 12390-1 (EN 12390-1, 2012), provetes cúbicos com 150mm de aresta. Para o aço foram realizados ensaios à tração de acordo com a norma ISO 6892-1 (ISO 6892-1, 2019), sendo um aço 280SD.

4.6.1 Betão leve

A determinação das características no betão consiste em comprimir um cubo de betão ou cilindro de acordo com a EN 12390-1. Para o ensaio recorreu-se a um atuador hidráulico (Figura 4.13, a)), tendo sido aplicada uma carga com ritmo constante com variação de 0,2 MPa/s a 1,0 MPa/s de acordo com a EN 12390-3 (EN 12390-3,2002).

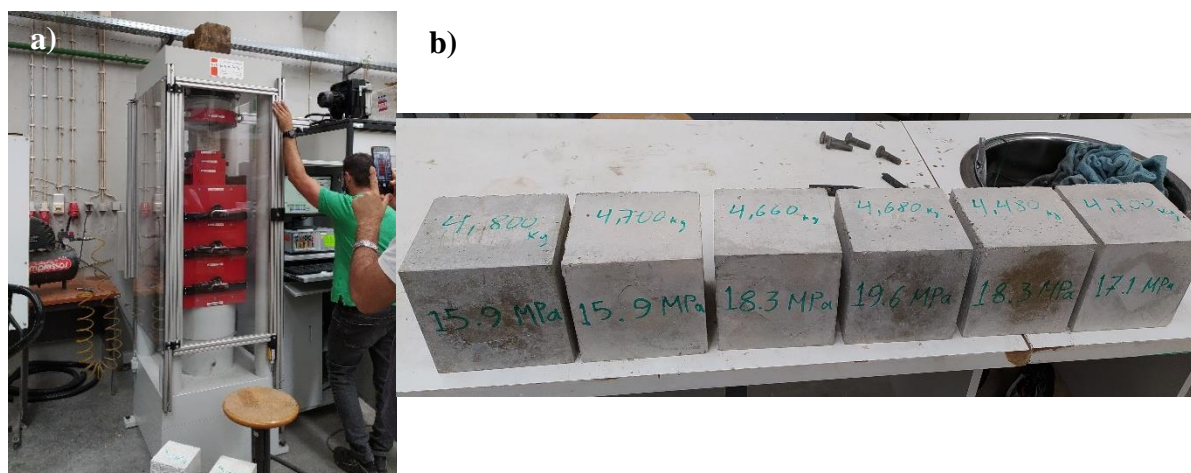


Figura 4.13 – a) Atuador hidráulico walter + bai. b) Provetes após solicitação de resistência

Quadro 4.1 – Resultados dos testes de compressão nos cubos em betão leve

Provete	Peso (g)	Densidade(Kg/m ³)	Carga de colapso	f _{ck} (MPa)
1	4800	1420	357.1	15.9
2	4700	1390	357	15.9
3	4660	1380	410.7	18.3
4	4680	1390	440.8	19.6
5	4480	1330	411.3	18.3
6	4700	1390	383.7	17.1
Média	4670	1383	393.4	17.5

A força de compressão é dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (22)$$

Em que:

f_{ck} é a força de compressão (MPa);

F é a carga máxima na rotura (N)

A_c é a área da secção da espécie em qua a força de compressão atua(mm^2).

Pela observação do (Quadro 4.1), verifica-se que o betão corresponde a uma classe estrutural classe D1,6 de Massa volúmica, densidade entre os 1200 – 1400 Kg/m^3 , (Figura 4.14) sendo que apresenta um valor característico de tensão de rotura à compressão após 28 dias de 17.5 MPa e portanto, enquadra-se na classe de resistência à compressão LC16/18.

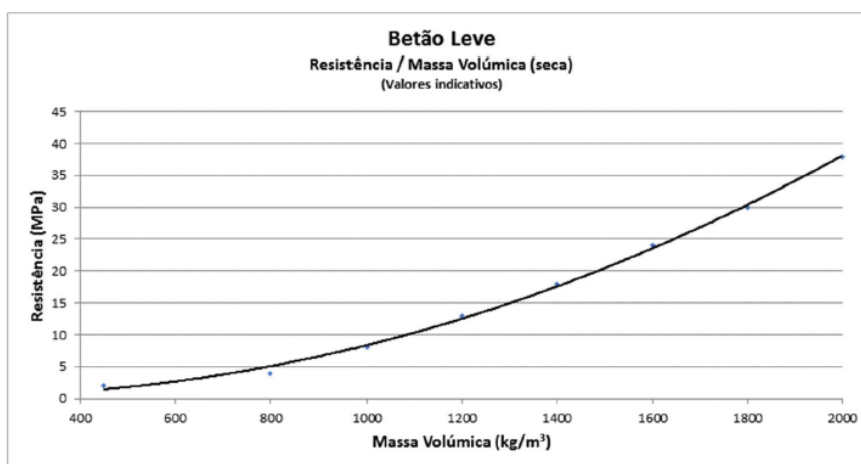
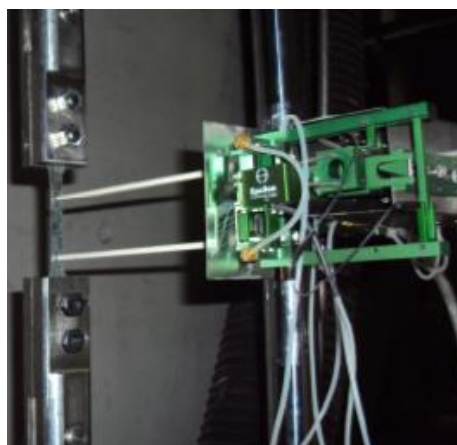


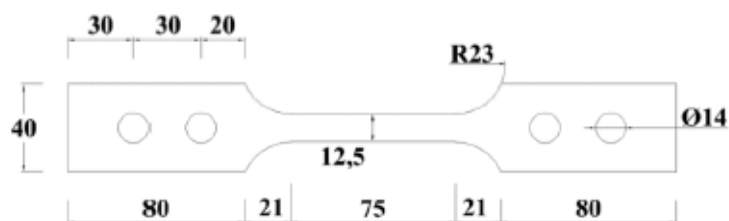
Figura 4.14 – a) Unileve estrutural (Adaptado de UniLeve Estrutural)

4.6.2 Aço enformado a frio

A caracterização do aço enformado a frio decorreu recorrendo a ensaios de tração (Figura 4.15) em provetes retirados de um perfil de aço S280GD+Z com 2.5mm de espessura. Foi utilizada uma máquina de teste universal modelo Servious ME402/20 com capacidade de 200KN e um extensómetro FLA-6-11. (Figura 4.8,b)).



a)



b)

Figura 4.15 – a) Layout de ensaio a temperatura ambiente, b) Dimensões do provete (Craveiro,2015)

Os provetes foram retirados na direção longitudinal da alma com dimensões de acordo com (EN 10002-1). Os valores nominais da tensão de cedência (f_y) e da tensão última (f_u) são 280 MPa e 360MPa, respetivamente. Pela observação da (Figura 4.16), verifica-se que os valores obtidos são de 300MPa para a tensão de cedência e 425MPa para a tensão última.

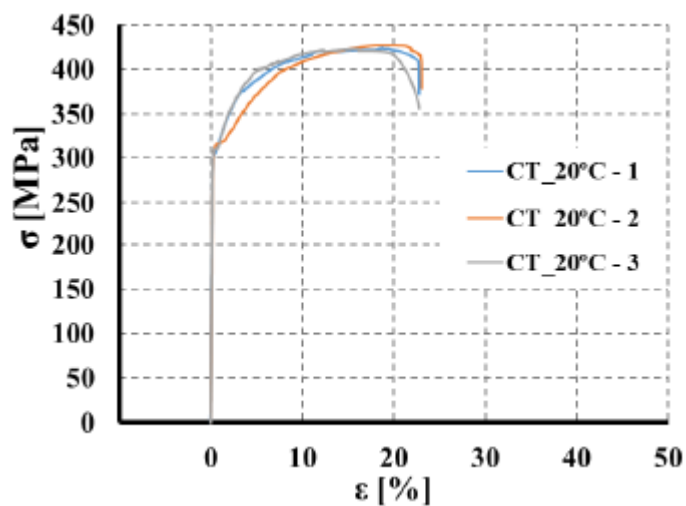


Figura 4.16 – a) Curvas de tensão-extensão (Craveiro,2015)

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios à flexão de 4 lajes mistas aço leve-betão leve.

São também apresentados os modos de rotura observados no decorrer dos ensaios, além de apresentados os resultados dos extensómetros e dos Lvdt's.

Após o primeiro ensaio, procedeu-se à alteração do layout, tendo-se transitado de 4 pontos de apoio para 6. Deste modo a carga aplicada pelo atuador hidráulico passou a distribuir-se por 4 pontos na laje, ao invés de 2. Esta alteração permitiu que a aplicação da carga decorresse de forma mais regular, em que os deslocamentos obtidos apresentam maior simetria relativamente ao eixo da laje. Outra alteração passou por colocar extensómetros a uma distância de $L/8$ do apoio, de modo a comparar o caminho das cargas de esforço transverso.

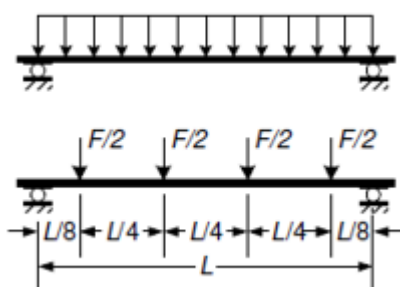


Figura 5.1 – Sistema de carregamento de 6 pontos

5.1 Laje 4 (Conexão Parcial com reforço do banzo inferior)

5.1.1 Modos de Colapso

A laje 4 apresenta conexão parcial e reforço do banzo inferior (Figura 5.2).

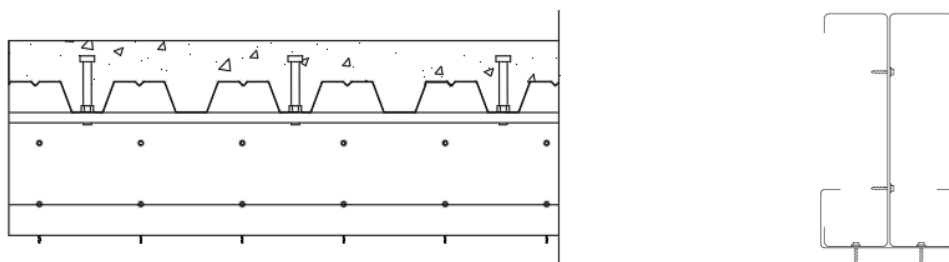


Figura 5.2 – Características da laje 4

Os modos de colapso da laje 4 apresentam-se (Figura 5.3 – a) Início da rotura em estado plástico. b) Rotura total do provete). Verifica-se que a rotura ocorreu devido a uma interação de roturas locais, nomeadamente separação do betão da chapa nas extremidades, corte longitudinal, esmagamento do banzo superior e da alma na zona de aplicação da carga. Ora, de referir que estes modos de colapso ocorreram após encurvadura local da alma e banzo superior, valores superiores ao comportamento em serviço e em estado elástico.

Esta laje, foi a que apresentou menor capacidade de carga, apesar ser do tipo com reforço do banzo inferior. Tendo sido esta a única laje a ser ensaiada com o sistema de apoio de 4 pontos, e a que os valores mais se afastaram do previsto, é de esperar que este tenha sido o fator decisivo. Outro fator de extrema importância está relacionado com as características do betão e sua compactação. Durante o processo de betonagem, foi visível a primeira laje a ser betonada, a laje 4, apresentou maior dificuldade de compactação, apesar da vibração da mesma. Em (Figura 5.5) é possível observar a deformada na laje em estado elástico.

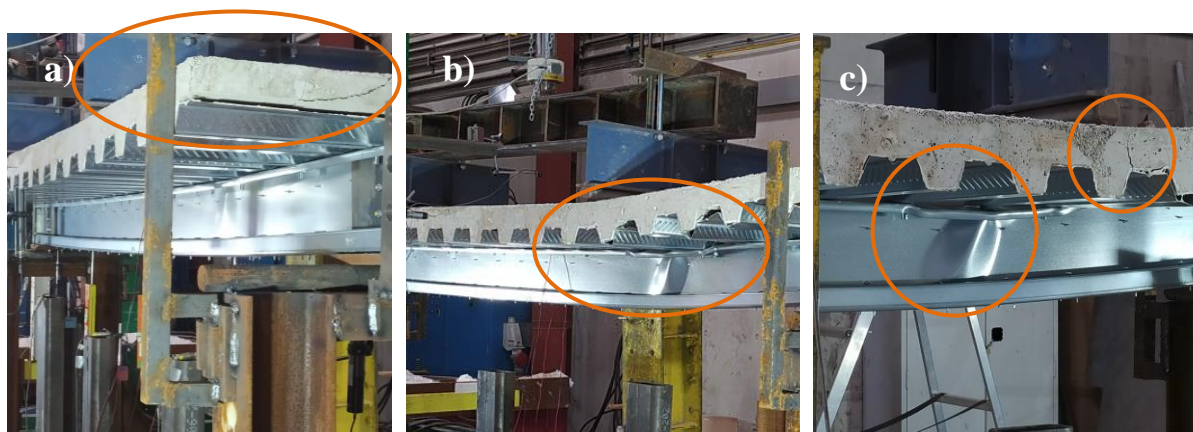


Figura 5.3 – a) Início da rotura em estado plástico. b) Rotura total do provete. c) Pormenor do esmagamento da alma e no banzo superior assim como fissuras no betão.

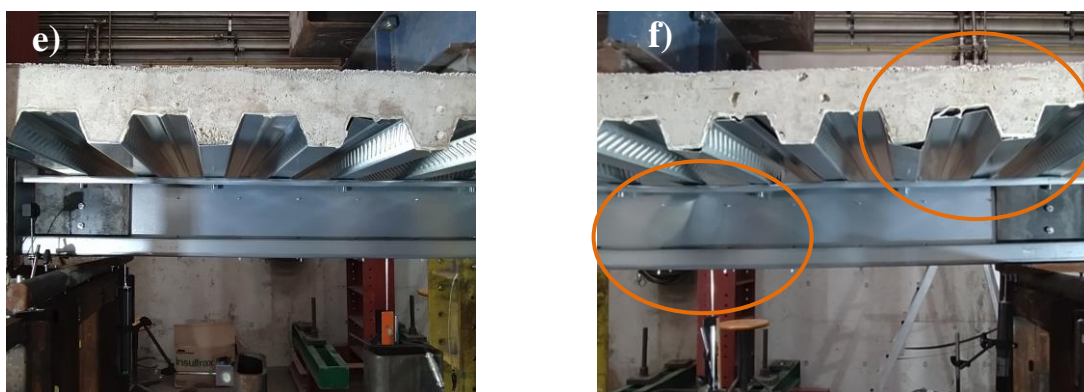


Figura 5.4 – Comparação dos modos de rotura em ambas as extremidades. e) Reduzidos danos. f) Danos a nível de fissuras no betão, separação do betão da chapa, esmagamento da alma e corte longitudinal.

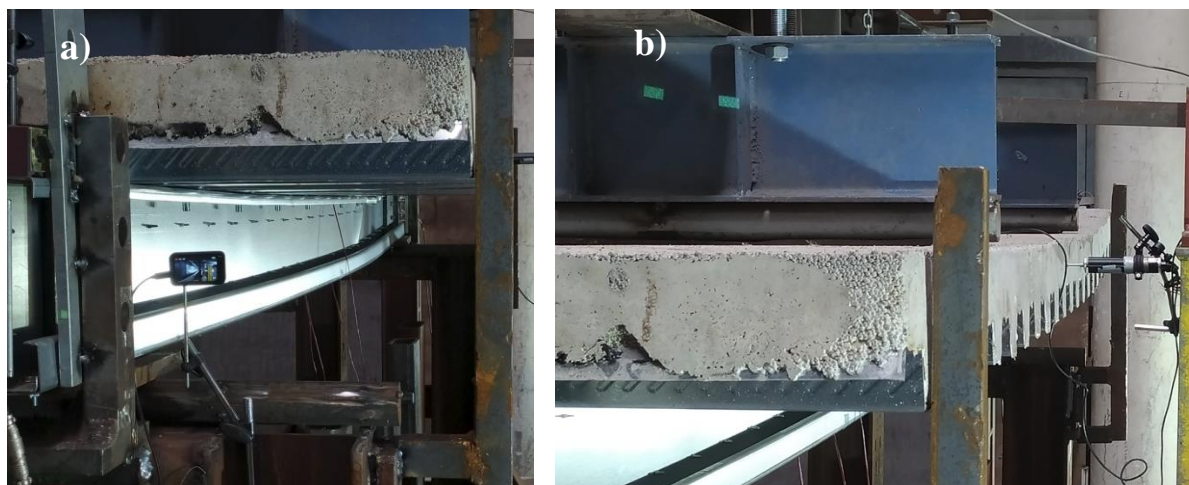


Figura 5.5 - Deformada, a) Vista inferior, b) Vista superior

5.1.2 Capacidade de carga

A carga máxima obtida encontra-se apresentada no Quadro 5.1. O valor obtido da carga corresponde à soma da carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico e do peso da estrutura utilizada para distribuição da carga, que tem possibilidade de deslocamento vertical.

Quadro 5.1 – Carga obtida experimentalmente para a laje 4

Provete	Carga aplicada (KN)	Peso da estrutura (KN)	Carga total (KN)
4	157.62	3.68	161.30

5.1.3 Evolução das deformações, deslocamentos e extensões

Os deslocamentos verticais e horizontais registados durante o decorrer do ensaio no âmbito desta dissertação encontram-se na Figura 5.6 – Deformações verticais e horizontais, sendo as extensões nos banzos superior e inferior apresentadas na Figura 5.7

Como seria de esperar, as maiores deformações ocorrem a meio vão, Lvdt 2, Lvdt 4, Lvdt 11 e Lvdt 12, sendo o que a leitura do Lvdt 4, em absoluto apresenta o mesmo valor que os anteriores. As deformações horizontais Lvdt 13, são muito reduzidas, uma vez o sistema de apoio restringir os fenómenos de encurvadura e os deslocamentos horizontais.

Pela observação da Figura 5.7, semelhante ao observado em Figura 5.6, até uma carga iguala 100KN, apresenta-se em regime elástico, sendo que até atingir a carga máxima, verifica-se que para o mesmo acréscimo de carga, as extensões evoluem mais rapidamente. Porém, após

a carga máxima ser atingida, verifica-se que esta decresce rapidamente, paralelamente ao regime elástico.

O comportamento assumido elasto-plástico $f_y = 300\text{MPa}$ e $\epsilon_{pl} = 1250 \cdot 10^{-6} \%$, não foi atingido, sendo o valor máximo $900 \cdot 10^{-6} \%$.

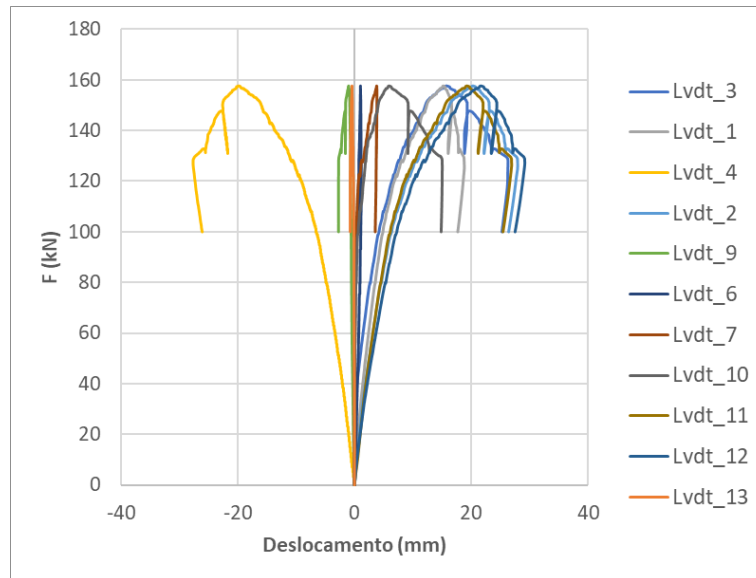


Figura 5.6 – Deformações verticais e horizontais

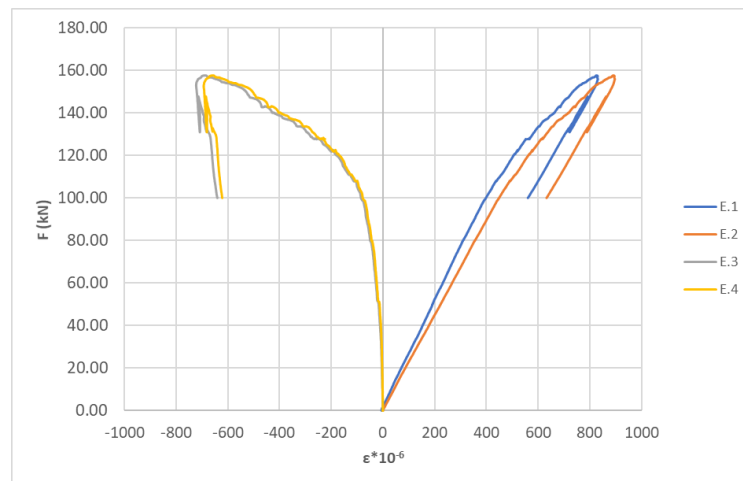


Figura 5.7 – Extensões laje 4

5.2 Laje 3 (Conexão Total com e reforço no banzo inferior)

5.2.1 Modos de Colapso

A laje 3 apresenta conexão parcial e reforço do banzo inferior (Figura 5.8).

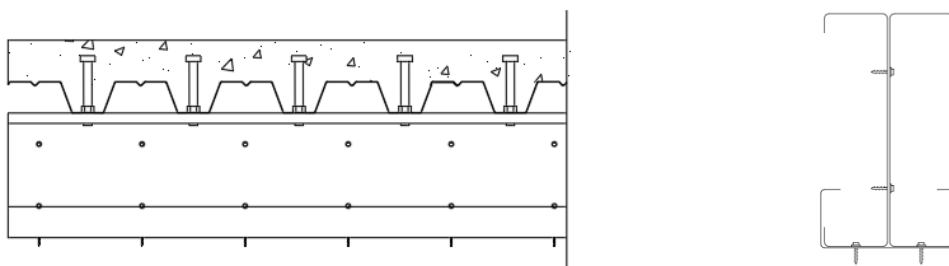
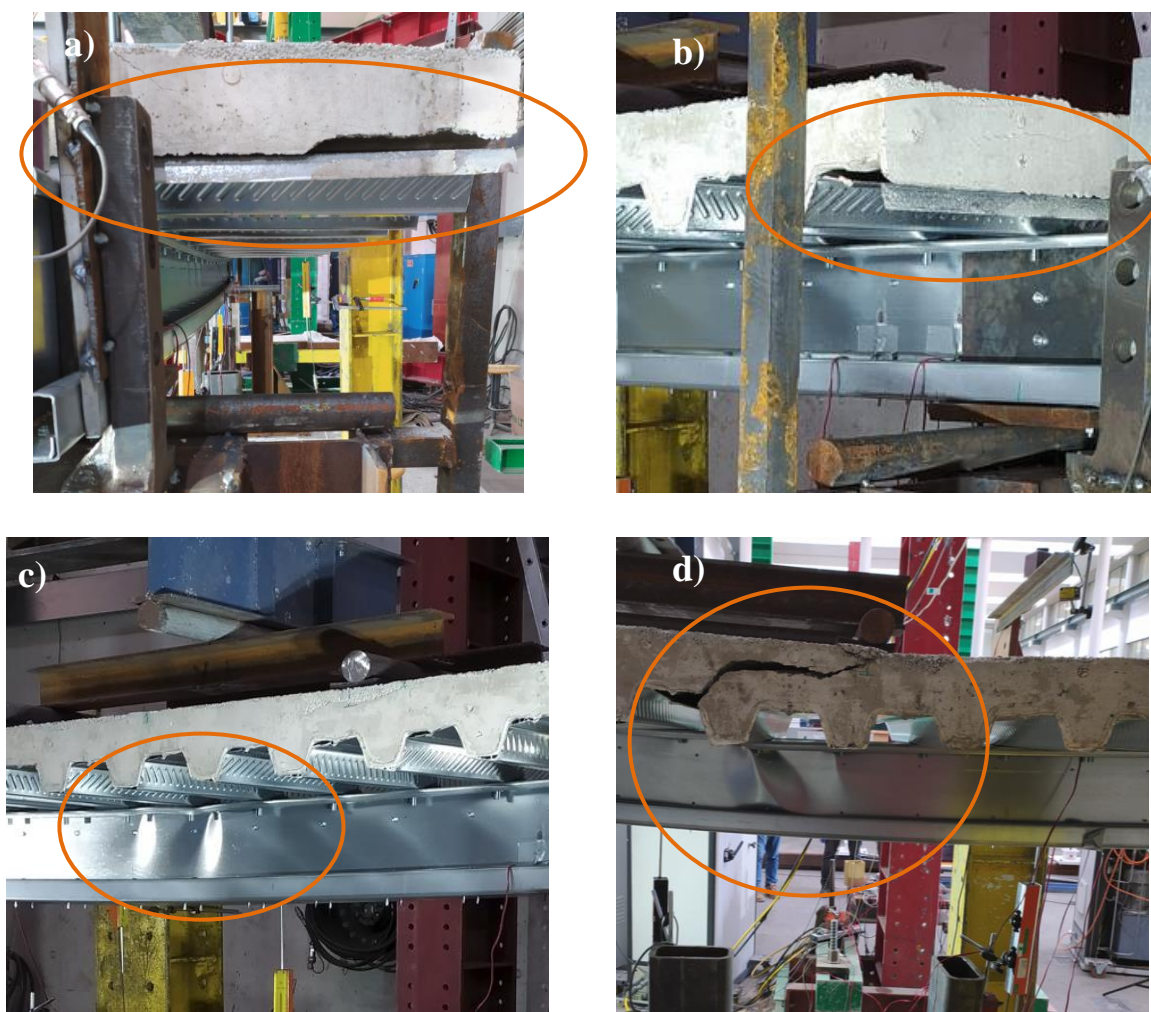


Figura 5.8 – Características da laje 3



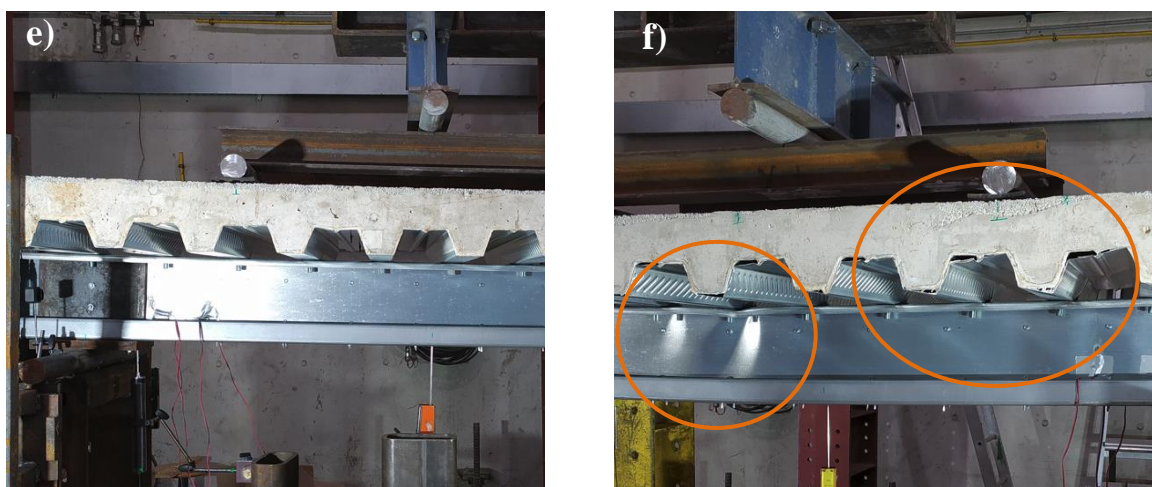


Figura 5.9 – Modos de rotura para a laje 3, a) Deformada da laje e separação do betão da chapa na extremidade, b) Esmagamento da alma e banzo superior, c) Fissura no betão e esmagamento da alma e banzo superior, e) e f) Comparação dos modos de rotura em ambas as extremidades, observando-se em f) Esmagamento da alma, do banzo superior, corte longitudinal pela inclinação dos conectores e separação do betão da chapa.

Os modos de colapso da laje 3 apresentam-se (Figura 5.9). Verifica-se que o colapso ocorreu devido a uma interação de roturas locais, separação do betão da chapa nas extremidades, corte longitudinal, esmagamento do banzo superior e da alma na zona de aplicação da carga. Durante o carregamento, a laje demonstrou uma distribuição uniforme e simetria dos deslocamentos, observado na Figura 5.11.

Esta laje, foi a que apresentou maior capacidade de carga, uma vez que apresentava a maior secção de área de aço, devido ao reforço do banzo inferior e conexão total.

O primeiro ponto de cedência ocorreu pela separação do betão da chapa, em ambas a extremidades, porém o deslocamento vertical já se encontrava acima do previsto para as condições de serviço. Situação que se agravou com o aumento da carga. Ora, a partir do momento que ocorre separação do betão, a laje deixa de trabalhar de forma mista, e portanto verifica-se redistribuição da carga apenas para a viga em aço. Assim, as fibras superiores do aço deixam de estar à tração e sofrem compressão (já numa fase plástica.). Simultaneamente, é visível tanto no betão como na alma do perfil em aço, a ação do esforço transversal.

5.2.2 Capacidade de Carga

A carga máxima obtida encontra-se apresentada no Quadro 5.2. O valor obtido da carga corresponde à soma da carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico e do peso da estrutura utilizada para distribuição da carga, que tem possibilidade de deslocamento vertical.

Quadro 5.2 – Carga obtida experimentalmente para a laje 3

Provete	Carga aplicada (KN)	Peso da estrutura (KN)	Carga total (KN)
3	249.06	5.39	254.45

5.2.3 Evolução das deformações, deslocamentos e extensões

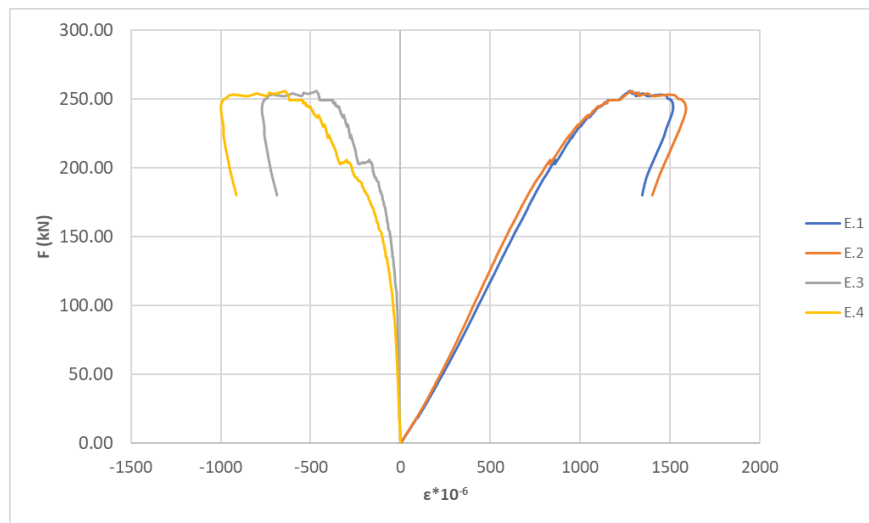


Figura 5.10 – Extensões fibras mais afastadas E3 (banzo inferior) e fibras menos afastadas E4 (banzo superior)

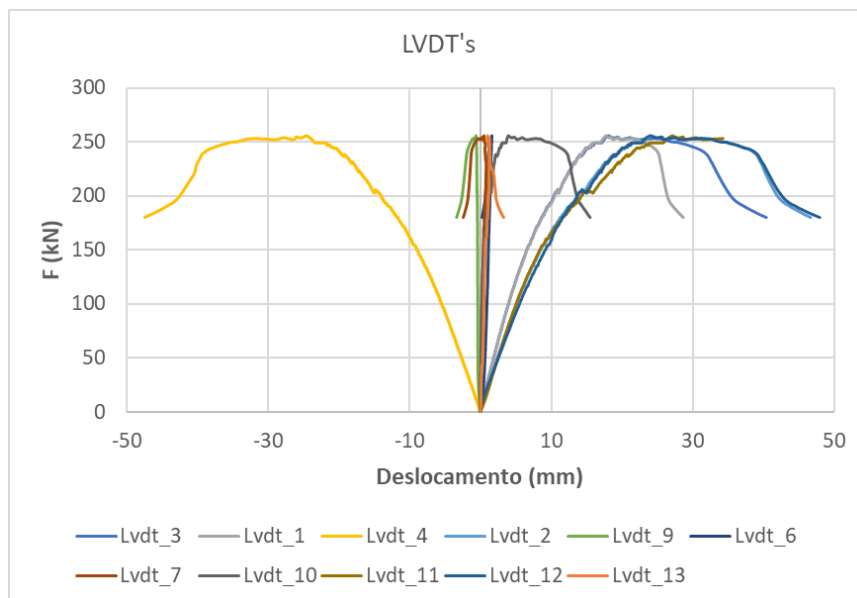


Figura 5.11 – Deslocamentos da laje 3

Os deslocamentos registados encontram-se apresentados na figura (Figura 5.11), que adotaram valores significativos a partir dos 200KN, tendo a carga máxima sido atingida para 20mm de deformação.

Outro parâmetro importante são as curvas Força-Extensão (Figura 5.10), em que por simplificação, foi considerado que o comportamento do material se encontra em regime elástico perfeitamente plástico, sendo $f_y = 300\text{MPa}$ e $\epsilon_{pl} = 1250 \cdot 10^{-6} \%$. Observa-se que para a carga de 200KN ocorre a primeiro ponto de cedência, porém o comportamento mantém-se até atingir a carga máxima, tendo -se atingido a extensão correspondente ao patamar de cedência para uma carga de 254.45 KN.

Na fase de descarga, fase elasto-plástica, observa-se que o gráfico apresenta inclinação semelhante à fase de carregamento elástica, sendo a descarga descrita por comportamento elástico, em que o diferencial correspondente à tensão residual.

5.3 Laje 2 (Conexão parcial)

5.3.1 Modos de Colapso

A laje 3 apresenta conexão parcial e reforço do banzo inferior (Figura 5.12).

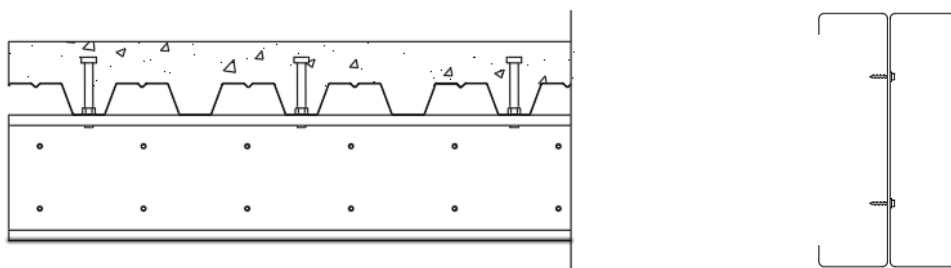


Figura 5.12 – Características da laje 2

Os modos de colapso da laje 2 apresentam-se (Figura 5.13). De modo semelhante à laje 3, verifica-se que a rotura ocorreu devido a uma interação de roturas locais, separação do betão da chapa nas extremidades, corte longitudinal, esmagamento do banzo superior e da alma na zona de aplicação da carga.

Na Figura 5.13, d), é possível observar uma zona de estrição no aço. Neste caso, ocorre diminuição de secção, ainda que a força diminua com o aumento da deformação, a tensão aumenta.



Figura 5.13 – a) e b) Separação do betão da chapa nas extremidades, c) Fissuras devido a esforço transversal, d) Plastificação do aço (Zona de estrição), e) e f) Separação do betão da chapa a meio vão. Corte longitudinal e esmagamento do banzo superior e alma.

5.3.2 Capacidade de Carga

A carga máxima obtida encontra-se apresentada no Quadro 5.3. O valor obtido da carga corresponde à soma da carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico e do peso da estrutura utilizada para distribuição da carga, que tem possibilidade de deslocamento vertical.

Quadro 5.3 – Carga obtida experimentalmente para a laje 2

Provete	Carga aplicada (KN)	Peso da estrutura (KN)	Carga total (KN)
2	176.06	5.39	181.45

5.3.3 Evolução das deformações, deslocamentos e extensões

Na Figura 5.14 estão representadas as deformações verticais e horizontais.

O provete apresenta uma deformação crescente linear, em que ao contrário do observado nos provetes 4 e 3, não são visíveis transições brutas nas curvas, pelo que a rotura ocorreu de forma mais progressiva. Os deslocamentos começaram a ser significativos para valores de carga acima de 140KN, quando adotam valores superiores a 10mm.

As extensões a meio vão apresentam-se na (Figura 5.15). Por simplificação, foi considerado que o comportamento do material se encontra em regime elástico perfeitamente plástico, sendo $f_y = 300\text{MPa}$ e $\varepsilon_{pl} = 1250 \cdot 10^{-6} \%$.

Na fase de descarga, fase elasto-plástica os extensómetros E1 e E2, apresentam valores diferentes para a fase de descarga, pode ser explicado por algum erro de leitura ou por imperfeições do material, porém verifica-se o comportamento elástico da descarga e tensão residual no material.

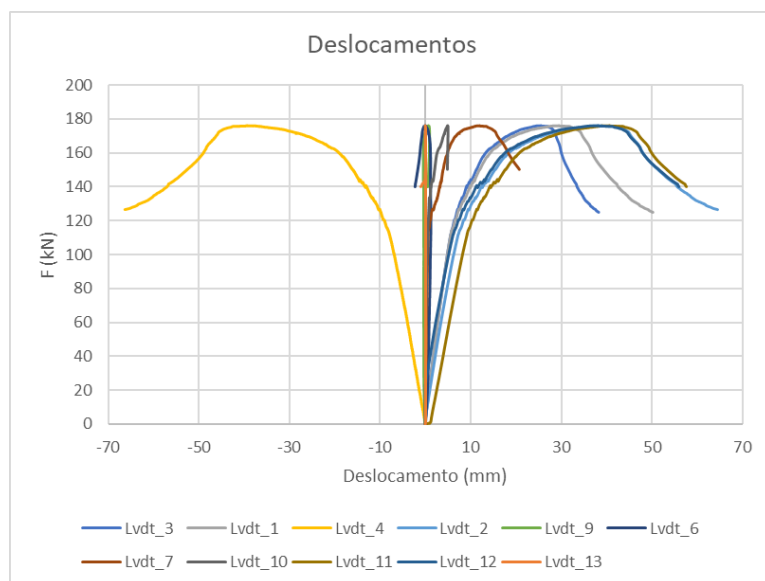


Figura 5.14 – Deslocamentos da laje 2

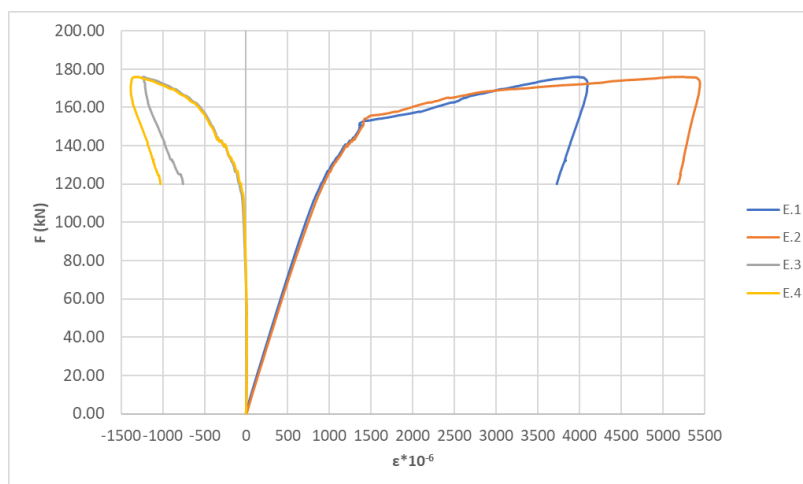


Figura 5.15 – Extensómetros banzo superior e banzo inferior, meio vão

5.4 Laje 1 (Conexão total)

5.4.1 Modos de Colapso

A laje 3 apresenta conexão parcial e reforço do banzo inferior (Figura 5.16).

Os modos de colapso da laje 1 apresentam-se (Figura 5.17). À semelhança da laje 2, é possível observar uma zona de estricção no aço. (Figura 5.17, d)

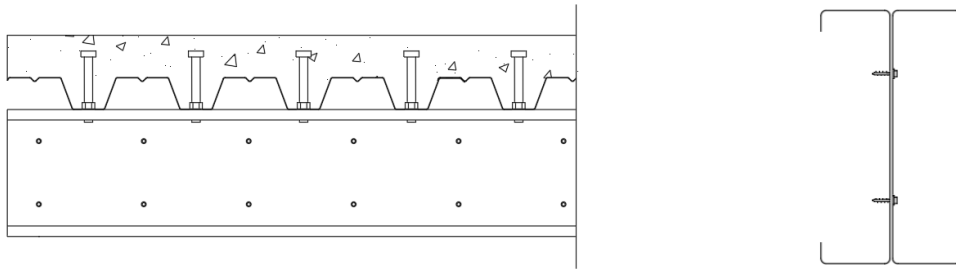


Figura 5.16 – Características da laje 1

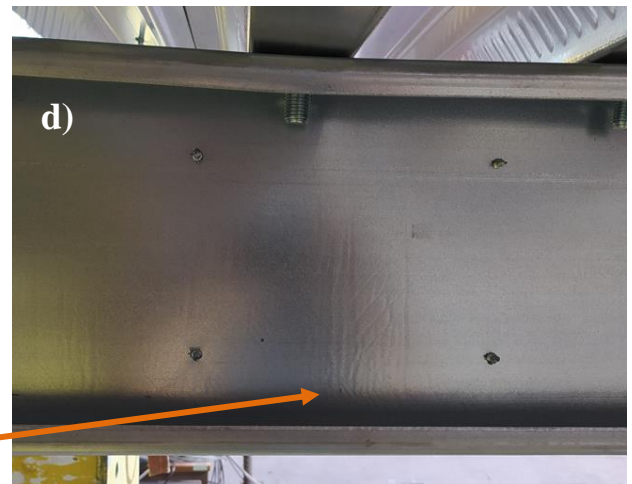
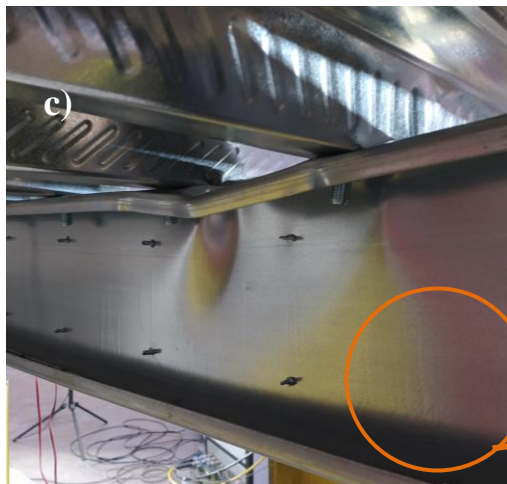
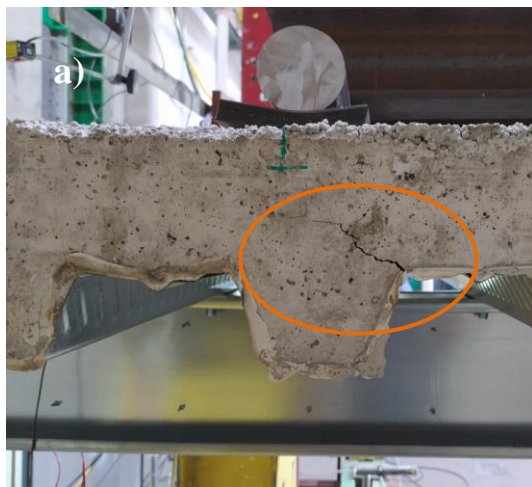




Figura 5.17 – a) Fissuração no betão, b) Deformada quando que formam fissuras no betão, c) Esmagamento do banzo superior e alma, d) Plastificação do aço, zona de estrição, e) Deformação final, f) Efeito do esforço de corte

5.4.2 Capacidade de Carga

A carga máxima obtida encontra-se apresentada no Quadro 5.4. O valor obtido da carga corresponde à soma da carga máxima aplicada pelo atuador hidráulico e do peso da estrutura utilizada para distribuição da carga, que tem possibilidade de deslocamento vertical.

Quadro 5.4 – Carga obtida experimentalmente para a laje 1

Provete	Carga aplicada (KN)	Peso da estrutura (KN)	Carga total (KN)
1	214.17	5.39	219.56

5.4.3 Evolução das deformações, deslocamentos e extensões

Na figura (Figura 5.18) estão representados os deslocamentos verticais e horizontais da laje 1.

Os deslocamentos horizontais são relativamente pequenos, devido à estrutura de contraventamento nos apoios de modo a simular o efeito de diafragma, à semelhança dos obtido nas outras lajes.

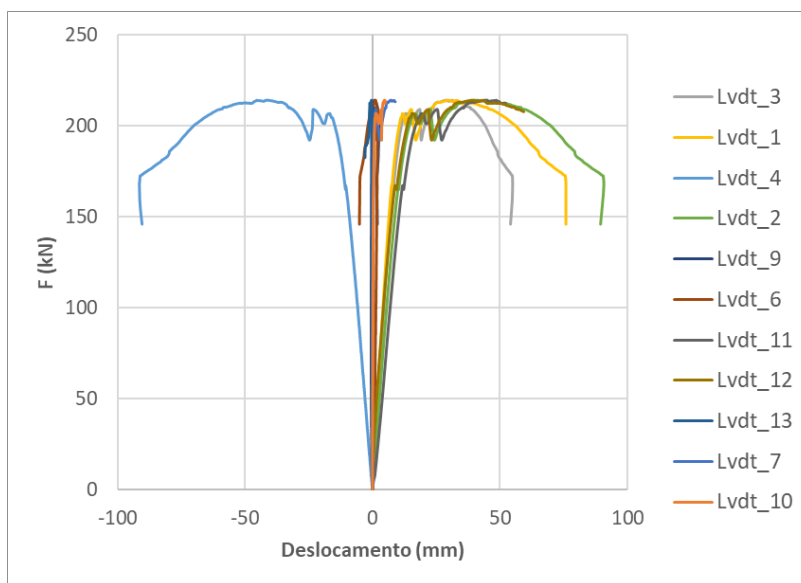


Figura 5.18 – Deslocamentos da laje 1

As extensões a meio vão apresentam-se na (Figura 5.19).

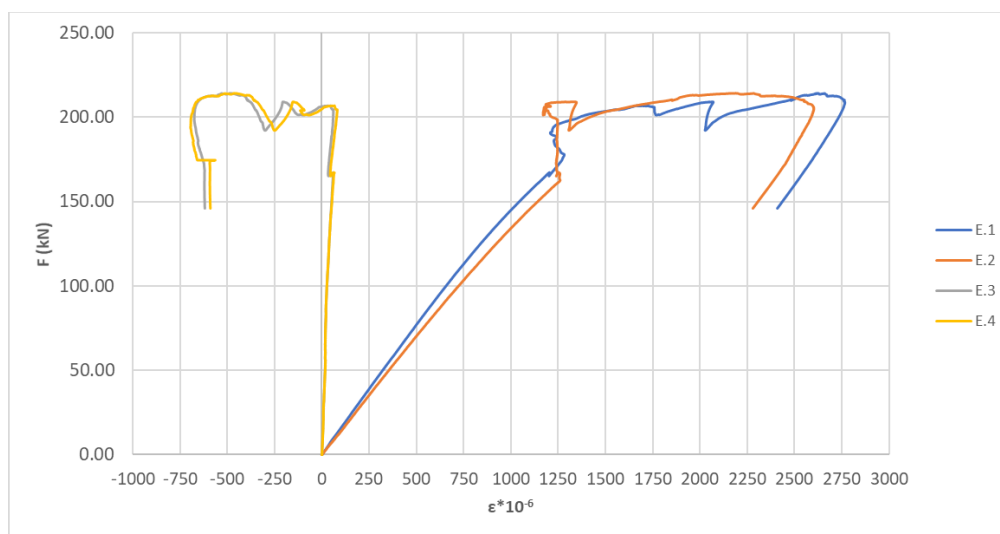


Figura 5.19 – Extensões laje 1

Por simplificação, foi considerado que o comportamento do material se encontra em regime elástico perfeitamente plástico, sendo $f_y = 300\text{MPa}$ e $\epsilon_{pl} = 1250 \cdot 10^{-6} \%$. Observa-se que para a carga entre os 150 e os 200kN, há uma evolução das extensões pouco significativa, ora esta situação é justificada pelo colapso no betão, tendo-se atingido a extensão correspondente ao patamar de cedência para uma carga de 219.56 KN.

Após atingir a carga máxima, em que o betão não é capaz de suportar mais carga, este mantém a tensão, porém o acréscimo da mesma é transferida para a viga em aço, pelo que é visível o aumento do valor das extensões. As passagens bruscas correspondem a roturas localizadas no betão resultantes do esforço de corte.

Na fase de descarga, fase elasto-plástica, é possível observar que o gráfico apresenta inclinação semelhante à fase de carregamento elástica, sendo a descarga descrita por comportamento elástico, em que o diferencial correspondente à tensão residual.

5.5 Comparação de resultados

A metodologia de cálculo apresentada pelo EC4 parte 1-1 é aplicada a secções mistas aço (laminado a quente) -betão, sem que sejam abordados o aço enformado a frio e o betão leve.

No Quadro 5.5 são apresentadas as cargas obtidas recorrendo à metodologia do Eurocódigo 4 parte 1-1 e aos ensaios experimentais.

O eurocódigo 4 parte 1-1, cláusula 6.2, forneceu uma estimativa conservadora para três soluções, pelo que é possível adaptar o dimensionamento do tradicional aço- betão para aço enformado a frio- betão leve.

Quadro 5.5 – Carga obtida experimentalmente e pelo Eurocódigo 4 parte 1-1

Provete	$P_{\text{experimental}}$ (KN)	$P_{\text{teórico}}$ (KN)	$P_{\text{teor}}/P_{\text{exp}}$
1	219.56	202.8	0.92
2	181.45	164.24	0.91
3	254.45	241.65	0.95
4	161.3	193.15	1.20

Para os provetes 1, provete 2 e provete 3, a carga obtida pela metodologia do eurocódigo 4 parte 1-1, apresenta valores conservativos, 0.92, 0.91 e 0.95, respetivamente. Para o provete 4, o mesmo não acontece, devido ao sistema de carregamento e à qualidade do betão, por se ter tratado de ser o primeiro provete a ser betonado.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação teve como objetivo estudar o comportamento à flexão de quatro vigas mistas inovadoras de aço enformado a frio e betão leve, em que foram variados dois parâmetros, o grau de conexão e a área de aço. Todo o processo foi executado com cuidado e precisão de modo a obter resultados viáveis, sendo detalhados o dimensionamento, procedimento experimental e comportamento dos provetes observado.

As vigas mistas apresentam uma boa solução de estrutura com bom comportamento do betão à compressão e do aço à tração, desde que seja garantida um grau de conexão suficiente para transmitir as tensões.

Dos ensaios experimentais, foi possível verificar exceto para a laje 4, devido ao modelo de carregamento, as restantes apresentaram comportamento semelhante, ainda que todos os modelos tivessem características diferentes. Isto é, o comportamento observado coincidiu com o comportamento esperado, em que foram garantidas as condições para estado limite de serviço, deformada e posteriormente apresentar comportamento dúctil com grande capacidade de armazenamento de energia, tendo-se verificado que a componente plástica representou entre 20 e 30% da carga suportada pelas vigas mistas.

Outro fator de grande importância é garantir que o perfil em aço enformado a frio se encontre totalmente em tração. Este ponto é de extrema importância e vem associado à qualidade e resistência do betão aplicado, de modo a garantir que o eixo neutro se encontre, idealmente acima da chapa colaborante. A partir do momento em que a viga mista sofre rotura no betão, por corte dos conectores ou por separação das chapas, a viga mista perde algumas características da interação dos dois materiais. O resultado é o deslocamento do eixo neutro para o topo do perfil em aço, deixando este de estar à tração e estar à compressão, condicionando bastante a resistência máxima a que a viga poderia suportar, mesmo para em regime elástico. Devido a nos ensaios experimentais não existir continuidade do provete, é possível que aquando da aplicação desta solução de forma contínua, a separação do betão da chapa seja menos corrente, uma vez que os deslocamentos associados às rotações vão ser também inferiores. Por outro lado, levanta-se outra questão, nas zonas dos apoios os diagramas de esforço teriam sinais contrários, pelo que ambos os materiais, aço enformado a frio e betão leve seriam solicitados para esforços mais desfavoráveis, pelo que seria necessário reforçar devidamente estes, no betão com armadura ordinária, evitando a fissuração, já no aço com reforços verticais, evitando o esmagamento.

6.1 Trabalhos futuros

Como sugestões de outros trabalhos, seguem as seguintes:

- Estudo de vigas mistas combinando aço enformado a frio e betão leve com aplicação de conectores de montagem mais rápida, uma vez que a conexão por parafusos de dupla porca segue um processo moroso;
- Estudo de vigas mistas combinando aço enformado a frio e betão leve de vãos maiores com secção fechada;
- O desenvolvimento de soluções pré-fabricadas, com uma construção e montagem mais rápida é também uma possibilidade a ter em conta;
- O desenvolvimento de estudos numéricos é uma mais valia, permite que se estudem mais configurações com custo e prazos reduzidos comparando com o experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarthi, Dr K., et al. (2019) “Comparative Study on Longitudinal Shear Resistance of Light Weight Concrete Composite Slabs with Profiled Sheets.” *Engineering Structures*, vol. 200, Elsevier, p. 109738, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109738>.

---. (2019). “Comparative Study on Longitudinal Shear Resistance of Light Weight Concrete Composite Slabs with Profiled Sheets.” *Engineering Structures*, vol. 200, p. 109738, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109738>.

Alhajri, T. M., et al. (2016). “Behavior of Pre-Cast U-Shaped Composite Beam Integrating Cold-Formed Steel with Ferro-Cement Slab.” *Thin-Walled Structures*, vol. 102, Elsevier, pp. 18–29, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.01.014>.

Algoro@ (2020), <https://algoro.com.pt/maquinas-perfiladoras/> Algoro (página internet oficial), Portugal.

Arseyds@ <https://sites.google.com/site/arsedys/arsedys/links-uteis/quinagem/processos-de-quinagem>. Arseys (página internet oficial), Portugal.

Bai, Liang, et al. (2019) “Longitudinal Shear Behaviour of Composite Slabs with Profiled Steel Sheeting and ECC.” *Engineering Structures*, vol. 205, no.p. 110085, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110085>.

Bamaga, S. O., et al. (2019). “Push-out Tests on Three Innovative Shear Connectors for Composite Cold-Formed Steel Concrete Beams.” *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 288–98, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.223>.

Bamaga, S O, et al. (2019). “Structural Behaviour of Cold-Formed Steel of Double C-Lipped Channel Sections Integrated with Concrete Slabs as Composite Beams.” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 16, no. 5, p. 195, <https://doi.org/10.1590/1679-78255515>.

EN 12390-1 (2012), “Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens”.

EN 12390-3 (2002), “Testing hardened concrete – Part 1: shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds”.

Bryan, E. R. (1980)“European Recommendations for Cold-Formed Sheet Steel in Building.” Fifth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1980: November 18-19; St. Louis, Missouri), pp. 7–32.

Bryan, Eric R., and James Rhodes. (1986) “Cold-Formed Steel Structures and New British Code of Practice.” Reports of the Working Commissions (International Association for Bridge and Structural Engineerin, vol. 49, pp. 15–26.

Calado, Luís, & Santos, João. (2010) “Estruturas Mistas de Aço e Betão.” *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Craveiro, Silva. (2015). "Fire Resistance of Cold-Formed Steel Columns". Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Fire Safety Engineering.

Andrade, Sebastiao A. L., et al.(2004) “Standardized Composite Slab Systems for Building Constructions.” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 3–5 , pp. 493–524, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00126-3](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00126-3).

Díaz, A., et al. (2020).“Residual Stresses in Cold-Formed Steel Members: Review of Measurement Methods and Numerical Modelling.” *Thin-Walled Structures*, vol. 159, p. 107335, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107335>.

Ferrol2industria@ <https://ferrol2industria.pt/product/quinadora-adira-pa-pa-plus/> (página internet oficial), Portugal.

EN 10346, (2015). EN 10346: Continuously Hot-Dip Coated Steel Flat Products for Cold Forming - Technical Delivery Conditions.

EN 1993-1-1 (2005), “Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings”, European Committee for Standardization, Brussels

EN 1993-1-3 (2006), “Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”, European Committee for Standardization (CEN), Brussels

EN 1993-1-5 (2006), “Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: General rules, Plated structural elements”, European Committee for Standardization, Brussels

EN 1994-1-1 (2004), “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings”, European Committee for Standardization, Brussels

Grossi, Luiz Gustavo Fernandes, et al. (2020). “Longitudinal Shear Strength Prediction for Steel-Concrete Composite Slabs with Additional Reinforcement Bars.” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 166, Elsevier Ltd, p. 105908, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105908>.

Hubertova, Michala, and Rudolf Hela. (2013). “Durability of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete.” *Procedia Engineering*, vol. 65, pp. 2–6, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.002>.

ISO 13918 (2015). International Iso Standard 9001.

Johnson, R. P. “Composite Structures of Steel and Concrete. (2004).” *Composite Structures of Steel and Concrete*, <https://doi.org/10.1002/9780470774625>.

Kan, Abdulkadir, and Ramazan Demirboğa. “A Novel Material for Lightweight Concrete Production.” *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 7, 2009, pp. 489–95, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002>.

Lawan, M. M., et al. (2020). “Flexural Performance of Cold-Formed Steel Section in a Composite Beam System.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 849, no. 1, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/849/1/012082>.

Lawan, Mustapha Muhammad, et al.(2016). “Bolted Shear Connectors Performance in Self-Compacting Concrete Integrated with Cold-Formed Steel Section.” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, no. 4, pp. 731–49, <https://doi.org/10.1590/1679-78252004>.

ISO 6892-1 (2019). “Metallic materials – Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature”, International Organization for standardization, Brussels

Orientador, Prof, and Rodrigo Barreto. (2008). **MISTAS DE AÇO E CONCRETO CONFORME Índice.**

ofeliz@ <https://www.ofeliz.pt/sites/default/files/business-area-files/oflz-chapa-perfilada-pt.pdf>. ofeliz (página internet oficial), Portugal.

Perfitec@ <http://perfitec.pt/2016/01/20/chapa-colaborante/>. Perfitec (página internet oficial), Portugal.

Rosli, Naida, et al. (2015) *Jurnal Teknologi.*, pp. 1–6.

Secil@ https://secilpro.com/produtos/nossos_produtos/betao/betao-leve/unilever-eps. Secil (página internet oficial), Portugal.

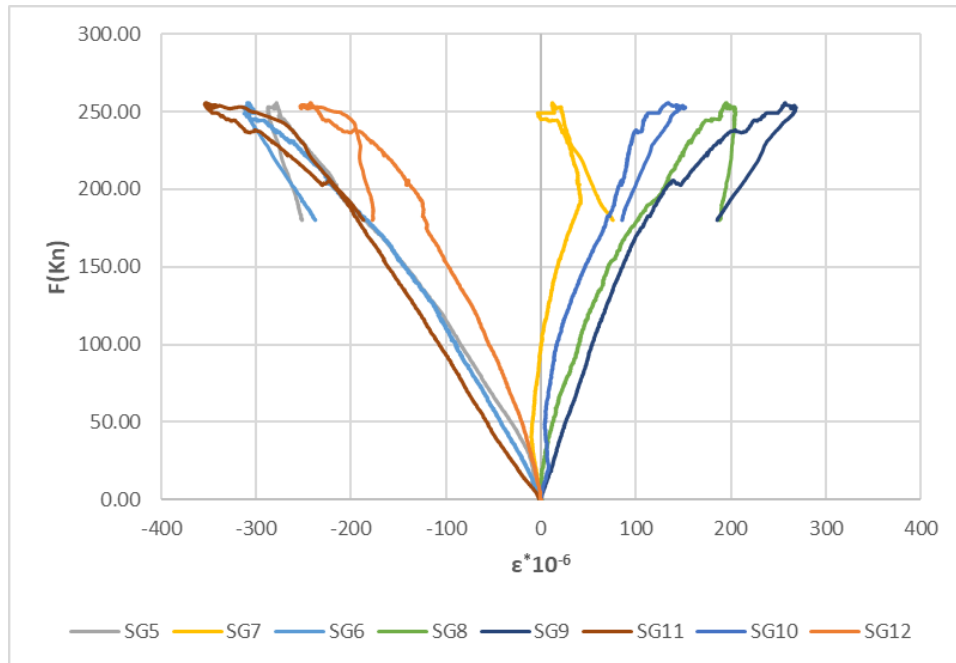
Schafer, B. W., and T. Peköz.(1998). “Computational Modeling of Cold-Formed Steel: Characterizing Geometric Imperfections and Residual Stresses.” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 47, no. 3, pp. 193–210, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8).

Standard, European. (1991).“EN 10002-5 Metallic Materials — Tensile Testing — Part 5 : Method of Testing at Elevated Temperature.” *Metallic Materials*.

Vijayalakshmi, R., and S. Ramanagopal. (2018).“Structural Concrete Using Expanded Clay Aggregate: A Review.” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 16, pp. 1–12, <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i16/121888>.

ANEXO A

Extensões de esforço transversal Laje 3;



Extensões de esforço transversal Laje 2;

