



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Departamento de Eng. Civil e Arquitetura

**Lajes mistas de betão armado sobre chapa
metálica colaborante. Estudo da interface
aço-betão**

João Pedro Pires Bernardo Ramos Fontes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor João António Saraiva Pires da Fonseca

UBI, Covilhã, Junho de 2016

(Ano letivo 2015/2016)

Agradecimentos

O presente trabalho foi desenvolvido na UBI - Universidade da Beira Interior sob orientação do professor doutor João António Saraiva Pires da Fonseca, a quem agradeço a disponibilidade, o apoio, os ensinamentos, o auxílio, o acompanhamento e conselhos prestados na resolução das diversas problemáticas teóricas e práticas com que me deparei neste percurso.

Na concretização do trabalho, fui acompanhado por várias pessoas e entidades, às quais demonstro a minha gratidão:

À UBI- Universidade da Beira Interior, pelas condições e meios disponibilizados na realização deste estudo.

À *O FELIZ Metalomecânica*, representada na pessoa do eng. José Manuel, pelos materiais e informação técnica fornecida.

Ao Sr. António Perpétuo, pela dedicação e auxílio prestado na construção metálica dos corpos do prova.

À *Betão Liz*, representada na pessoa do Sr. João Amaro, pelo betão e informação técnica fornecida.

À eng. Maria José, pela sua disponibilidade e disponibilização de recursos materiais e humanos para a realização do trabalho prático.

Aos assistentes técnicos, Sr. Albino Alves, Sr. Luciano Rato, Sr. António Félix, Sr. Paulo Guerra, Sr. João Correia e Sr. Jorge Bento dos laboratórios dos departamentos de Engenharia civil e Eletromecânica, pelos ensinamentos e pelo apoio prestado na execução do trabalho do trabalho experimental.

Ao professor doutor Clemente Pinto, pela sua disponibilidade, os seus ensinamentos e auxílio prestados na realização do trabalho prático.

Ao meu amigo Daniel Diogo, pela ajuda, interesse e empenho na realização do trabalho prático, bem como pela sua motivação e promoção de momentos de humor que aligeiraram este percurso.

Aos meus colegas de curso e amigos, pelo companheirismo ao longo deste percurso académico.

Ao eng. Paulo Ribeiro e restantes colegas de trabalho da *Egisete, Serviços de Engenharia e Fiscalização*, pela disponibilidade, flexibilidade de horário, motivação e apoio que demonstraram ao longo deste percurso. Agradeço também pelo seu auxílio na obtenção de materiais necessários à realização dos trabalhos

laboratoriais e pelos momentos de humor que aliviaram os últimos tempos mais difíceis e trabalhosos.

À minha namorada Maria e à sua família, pelo encorajamento e apoio nos momentos mais exigentes.

Ao meu pai, Carlos Manuel, e à minha mãe, Lídia Maria, não só por terem possibilitado e apoiado todo o meu percurso académico, mas sobretudo pelos ensinamentos que me transmitem todos os dias, estando sempre presentes em todas as fases da minha vida.

À minha irmã Ana Catarina, pelo seu testemunho de persistência e trabalho, bem como pela sua motivação e ânimo nos momentos mais difíceis.

Resumo

O presente estudo tem como objetivo caracterizar o comportamento da interface aço-betão em lajes mistas formadas por chapa de aço colaborante sobre a qual é colocada uma camada de betão e que são ligados por sistemas mecânicos ou de atrito.

Verificando a diversidade de chapas perfiladas disponíveis para execução desta solução construtiva, podem surgir questões quanto aos benefícios relativos entre tipos de perfis (reentrante e trapezoidal). O comportamento da chapa perfilada e em particular da interface, foi avaliado recorrendo a uma metodologia adequada que permitiu descrever o caminho e o equilíbrio de forças no elemento estrutural. Recorreu-se de uma metodologia decomposta em duas partes: análise numérica e experimental.

Na análise numérica foram construídos modelos cálculo tridimensionais que permitiram calcular, com recurso ao método de elementos finitos, as tensões atuantes em elementos volumétricos. A informação obtida é analisada e interpretada de forma a descrever o caminho de forças através da estrutura e é proposto um modelo de escoras e tirantes que permita descrever o equilíbrio de forças no interior da secção trapezoidal. Com base na análise de tensões é proposta uma nova solução para a conexão e apontam-se possibilidades de evolução da forma das bossas atualmente utilizadas na solução corrente que é analisada ao longo do trabalho.

Com a metodologia experimental, ensaiam-se provetes, especificamente concebidos no âmbito deste trabalho, com o intuito de demonstrar que o modelo de escoras e tirantes é adequado e que a solução proposta é viável.

Por fim, concluindo-se sobre a investigação realizada, e propondo-se pontos de partida para investigações futuras.

Abstract

This study aims to characterize the behavior of the steel-concrete interface in composite slabs formed by profiled steel plate on which a layer of concrete, is placed connected by mechanical systems or friction.

Checking the diversity of profiled sheets available for this constructive solution, there may be questions about the relative benefits between types of profiles. The behavior of the profiled steel deck and interface was evaluated using a suitable methodology aiming to describe the path and the equilibrium of forces in the structural element. The used methodology can be decomposed into two parts: experimental and numerical analysis.

In the numerical Analysis, three-dimensional models were constructed, which were used to calculate the stresses acting in the volumetric elements, using the finite element method. The information obtained was analyzed and interpreted to describe the force paths through the structure and a strut-and-tie model were proposed to describe the equilibrium of forces. Based on the stress analysis a new solution for the steel-concrete connection is proposed and some possibilities of evolution in the embossments shape for the common solution, that is analyzed throughout the study, are indicated.

With the experimental methodology, specimens specifically built in the frame of this work, were tested in order to demonstrate that the strut-and-tie model is appropriate and that the proposal solution is viable.

Finally, research carried out is concluded and starting points for further investigations are proposed.

Índice

Capítulo 1- Introdução.....	1
1.1- Motivação	1
1.2 - Enquadramento histórico do tema.....	1
1.3 - Objeto de estudo.....	3
1.5 - Objetivos	6
1.6 - Organização do trabalho	7
Capítulo 2 - Revisão bibliográfica	9
2.1 - Composição e comportamento	9
2.1.1 - Ligação aço-betão	9
2.1.2 - Forças na interface aço-betão	10
2.1.3 - Interface aço-betão.....	12
2.1.4 - Formas de conexão	14
2.1.5 - A conexão mecânica e o mecanismo de rotura	16
2.1.6 - Análise paramétrica da interface aço-betão.....	18
2.2 - Determinação do esforço de corte longitudinal resistente	22
2.2.1 - Método “m-k”	22
2.2.2 - Método da tensão τ_u ou da conexão parcial	25
2.2.3 - Ensaio de escorregamento.....	30
2.2.4 - Ensaio de arranque	31
2.2.5 - Método das forças de equilíbrio.....	34
2.2.6 - Método de elementos finitos	38
Capítulo 3 - Metodologia	43
3.1 - Objetivo da metodologia proposta	43
3.2 Princípios gerais da metodologia.....	43
3.2.1 - Método de elementos finitos	43
3.2.2 - Modelo de escoras e tirantes.....	44
3.2.3 - Método experimental.....	46
3.3 - Procedimento geral da metodologia	48
Capítulo 4 - Análise numérica	51
4.1 - Modelação de perfis	51
4.2 - Análise de tensões	53
4.2.1 - Secção Trapezoidal	53
4.2.2 - Secção Reentrante	57
4.2.3 - Secção Retangular	62

4.2.4 - Análise dos resultados	67
4.3 - Direções principais de tensão.....	68
4.4 - Modelo de escoras e tirantes	71
4.5 - Caminho de carga	75
4.6 - Aplicação com modelo de escora e tirantes.....	75
4.7- Proposta de nova solução	80
Capítulo 5 - Metodologia Experimental.....	83
5.1- Construção de provetes	83
5.2 - Condições de ensaio.....	85
5.3 - Preparação dos ensaios laboratoriais	87
5.4 - Primeira fase de ensaios laboratoriais.....	89
5.4.1 - Montagem laboratorial.....	89
5.4.1 - Procedimento experimental	90
5.4.2 - Realização dos ensaios.....	90
5.4.3 - Análise de dados recolhidos.....	93
5.5 - Segunda fase de ensaios laboratoriais.....	95
5.5.1 - Montagem laboratorial.....	95
5.5.1 - Procedimento experimental	97
5.5.2 - Realização dos ensaios.....	97
5.5.3 - Análise de dados recolhidos.....	100
5.6 - Métodos de rotura dos corpos de prova	102
5.7 - Análise da rotura dos corpos de prova	103
Capítulo 6 - Considerações finais.....	109
6.1- Principais conclusões	109
6.2- Trabalhos Futuros	112
Bibliografia	113
ANEXOS.....	117
Anexo 1 - Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio.....	117
Anexo 2 - Montagem laboratorial - primeira fase de ensaios.....	119
Anexo 3 - Registo fotográfico - primeira fase de ensaios	131
Anexo 4 - Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios.....	133
Anexo 5 - Montagem laboratorial - segunda fase de ensaios	153
Anexo 6 - Registo fotográfico - segunda fase de ensaios.....	165
Anexo 7 - Informação técnica recolhida - segunda fase de ensaios	167

Índice de figuras

Figura 1 Rotura por corte longitudinal na interface aço-betão (adaptado [3])	3
Figura 2 Tipos de chapas perfiladas (adaptado [2][1])	4
Figura 3 Inclinação de almas das secções tipo	5
Figura 4- Chapa perfilada HAIRCOL 59s	5
Figura 5- Chapa perfilada Cofraplus 60	6
Figura 6- Chapa perfilada ComFlor 51.....	6
Figura 7 Influência do grau de conexão (adaptado [5]).....	9
Figura 8 Influência do grau de interação (adaptado [5])	10
Figura 9 Diagramas de tensão normal (esquerda) e tangencial (direita) para secções mistas com interação total e nula (adaptado [25]).....	11
Figura 10 Rotura por corte longitudinal - interface após ensaio de flexão (adaptado [17])	12
Figura 11 - Esquema do mecanismo de resistência ao corte longitudinal (adaptado [17])	13
Figura 12 Exemplo de separação vertical (adaptado [25])	13
Figura 13 - Tipos de conectores (adaptado [5]).....	15
Figura 14 - Ensaio de flexão, gráfico de Carga vs Escorregamento (adaptado[11])	16
Figura 15 Fissuração em ensaios de flexão (adaptado [10])	17
Figura 16 - Mapas de tensões para bossas com relevo positivo e negativo (adaptado [17])	19
Figura 17 - Influencia de: coeficiente de atrito, μ (a), declive da bossa (b), espessura do perfil (c), espessura da bossa (d), ângulo do perfil (e) e inclinação da bossa (f) na resistência ao corte longitudinal (kN) (adaptado [17])	21
Figura 18 Curvas tipo do comportamento da conexão (adaptado [5]).....	24
Figura 19 Tratamento de resultados método “m-k” (adaptado [2])	25
Figura 20 Curva de interação e processo de determinação do grau de conexão, η (adaptado[2])	26
Figura 21 Decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado[5])	28
Figura 22 Nova decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado [10]).....	29
Figura 23 Coeficientes de redução η_1 e η_2 propostos (adaptado [10]).....	30
Figura 24 Ensaio de escorregamento (adaptado [25])	30
Figura 25 Resultados do ensaio de escorregamento (adaptado [25])	31
Figura 26 - Corpo de prova para ensaios de arrancamento (adaptado [14]).....	33

Figura 27 - Resultado típico de ensaios de arrancamento (adaptado [14])	34
Figura 28 Ensaio de flexão em uma nervura de laje mista (adaptado [19]).....	35
Figura 29 Fissuração da laje ensaiada (a); Deslocamentos e curvatura da laje ensaiada (b) (adaptado [18])	35
Figura 30 Diagrama de corpo livre da laje (a); Diagrama de extensões (b); Diagrama de tensões e esforços internos (c) (adaptado [18]).....	35
Figura 31 Comportamento $\sigma - \varepsilon$ dos materiais: a) chapa perfilada; b) rede electrosoldada; c) betão (adaptado [14])	39
Figura 32 Modelo analítico da interface aço-betão (adaptado [6]).....	40
Figura 33 Representação da fragmentação de um elemento contínuo (adaptado [28])..	44
Figura 34 exemplo da fração de chapa perfilada a utilizar nos ensaios de arranque	47
Figura 35 desenho esquemático dos corpos de prova (secção transversal)	47
Figura 36- Chapa perfilada H60.....	51
Figura 37- Secção retangular em estudo	51
Figura 38- Secção reentrante em estudo.....	51
Figura 39 - Malha de EF de cálculo.....	52
Figura 40 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal).....	53
Figura 41 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Trapezoidal)	54
Figura 42 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Trapezoidal)...	55
Figura 43 - Tensões transversais, τ_{xy} , na interface aço- betão (Secção Trapezoidal).....	55
Figura 44 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Trapezoidal)	56
Figura 45 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Trapezoidal)	57
Figura 46 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal)	57
Figura 47 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)	58
Figura 48 - Tensões, σ_{xx} , no betão (Secção Reentrante)	58
Figura 49 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Reentrante) ...	59
Figura 50 -Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Reentrante)	60
Figura 51 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Reentrante).....	60
Figura 52 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Reentrante).....	61
Figura 53 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)	62
Figura 54 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Retangular).....	62
Figura 55 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Retangular).....	63
Figura 56 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Retangular)	64
Figura 57 - Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Retangular).....	65

Figura 58 - Tensões de separação dos materiais ao lo longo da interface aço-betão (Secção Retangular).....	65
Figura 59 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Retangular).....	66
Figura 60 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Retangular)	66
Figura 61 - Representação em planta dos eixos principais	69
Figura 62 - Representação em alçado dos eixos principais.....	70
Figura 63 - Representação em corte transversal dos eixos principais	70
Figura 64 - Representação tridimensional dos eixos principais.....	71
Figura 65 - Inclinação das escoras e tirantes da treliça de betão.....	72
Figura 66 - Alçado do modelo de escoras e tirantes	73
Figura 67 - Planta do modelo de escoras e tirantes.....	73
Figura 68 - Corte do modelo de escoras e tirantes.....	73
Figura 69 - Modelo Virtual de escoras e tirantes	74
Figura 70 - Modelo físico de escoras e tirantes	74
Figura 71 - Caminho de carga (Secção Trapezoidal)	75
Figura 72 - Modelo de escora e tirantes contruído no software	76
Figura 73 - Esforços na treliça de betão	76
Figura 74 - Escoras de ligação entre os materiais	77
Figura 75 - Trações na chapa perfilada nas almas e no banzo inferior	78
Figura 76 - Trações segundo o eixo xx ao nível dos banzos	78
Figura 77 - Adaptação do STM à secção reentrante	79
Figura 78 - Distribuição antissimétrica de bossas - chapa perfilada H60.....	81
Figura 79 - Solução de proposta.....	82
Figura 80 - Soldadura dos corpos de prova	83
Figura 81 - Soldadura dos corpos de prova	83
Figura 82 - Corpos de prova após construção da parte metálica	84
Figura 83 - Proвете construído com solução proposta	85
Figura 84 - Rebarbagem de varões.....	85
Figura 85 - Cura dos provetes	85
Figura 86 - Imagem tridimensional - vista inferior	86
Figura 87 - Imagem tridimensional - vista superior	86
Figura 88 - Remoção de chapa de cofragem.....	87
Figura 89 - Descofragem de corpos de prova.....	87
Figura 90 - Corpo de prova pronto para ensaio	87
Figura 91 - Esquema da estrutura selecionada.....	88
Figura 92 - Fotografia da estrutura selecionada	88

Figura 93 - Montagem Laboratorial - primeira fase de ensaios.....	90
Figura 94 - Primeira fissura (50 kN $\delta=0,12\text{mm}$) - CP.1.H60	91
Figura 95 - Corpo de prova após rotura (128 kN $\delta=11,86\text{mm}$) - CP.1.H60	92
Figura 96 - Interface no betão -	93
Figura 97 - Interface no aço - CP.1.H60 após rotura	93
Figura 98 - Vista superior -CP.1.H60 após rotura	93
Figura 99 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.2.H60	94
Figura 100 - Esmagamento do betão na interface (aço) - CP.2.H60.....	95
Figura 101 - Montagem Laboratorial - segunda fase de ensaios.....	97
Figura 102 - Primeira fissura (50 kN $\delta=1,18\text{mm}$) - CP.3.NSP.....	98
Figura 103 - Corpo de prova após rotura (372 kN $\delta=5,85\text{mm}$) - CP.3.NSP	99
Figura 104 - Interface no betão - CP.3.NSP após rotura	100
Figura 105 - Interface no aço -	100
Figura 106 - Vista superior - CP.3.NSP após rotura	100
Figura 107 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.4.NSP	101
Figura 108 - Esmagamento do betão na interface (aço) - CP.4.NSP.....	102
Figura 109- Modelo de escoras e tirantes do ensaio	104
Figura 110 - Gráfico deslocamento relativo - força atuante / tensão tangencial τ	107

Índice de expressões

Expressão 1 fluxo de corte longitudinal.....	10
Expressão 2 Determinação do esforço de corte longitudinal resistente.....	23
Expressão 3 grau de conexão método τ_u	26
Expressão 4 Determinação da tensão última de corte, τ_u	27
Expressão 5 Determinação do comprimento de conexão total	27
Expressão 6 Determinação do eixo neutro plástico do betão	27
Expressão 7 Determinação do momento resistente da secção com rotura por corte longitudinal	28
Expressão 8 Determinação da componente de flexão do diagrama de flexão plástica ..	28
Expressão 9 Braço do binário de forças tração no aço e compressão no betão	28
Expressão 10 Determinação do momento resistente da secção com rotura por corte longitudinal - método revisto.....	29
Expressão 11 Determinação do braço do binário compressão-tração na secção	29
Expressão 12 Cálculo da tensão última de corte	31
Expressão 13 Calculo da força de corte longitudinal (Método das forças de equilíbrio) .	36
Expressão 14 Calculo do momento fletor resistente do solicitado no instante t	36
Expressão 15 Braço do binário de forças compressão - tração (Método das forças de equilíbrio)	37
Expressão 16 Posição do eixo neutro da secção mista (Método das forças de equilíbrio)	37
Expressão 17 Posição do eixo neutro da secção mista com o betão fissurado (Método das forças de equilíbrio)	37
Expressão 18 - Tensor das tensões.....	68

Lista de Acrónimos

AISI - American iron and steel institute

ISU - Iowa state university

FEM - método de elementos finitos

EF - elementos finitos

STM - modelo de escoras e tirantes

Simbologia

M_{Ed} - Momento fletor atuante

M_{Rd} - Momento fletor resistente

V_{Ed} - Esforço de Corte longitudinal atuante

V_{Rd} - Esforço de Corte longitudinal resistente

V_{Ed} - Esforço de Corte transversal atuante

V_{Rd} - Esforço de Corte transversal resistente

μ - Coeficiente de atrito

$q(x)$ - fluxo de corte longitudinal

A_p - área de aço da chapa perfilada

μ - grau de conexão

N_c - força de compressão atuante no betão

N_{cf} - força máxima de compressão no betão em situação de conexão total

f_{cd} - tensão resistente de cálculo do betão

f_{ck} - tensão característica do betão

f_{yd} - tensão resistente de cálculo do aço

f_{yk} - tensão característica do aço

$V(x)$ - esforço transversal ao longo do vão

e.n. - eixo neutro

S - momento estático da secção homogeneizada

I - inércia da secção homogeneizada

L - vão

W_t - Carga de rotura espectável

L_s - vão de corte

b - largura da secção transversal

d_p - altura média da secção
 γ_{vs} - coeficiente parcial de segurança

τ_u - tensão de corte longitudinal

M_{pa} - momento fletor resistente plástico da chapa perfilada

N_{pa} - resistência à tração da chapa perfilada

h - espessura da laje mista

$z_{pl,c}$ - posição do eixo neutro plástico do betão

e_p - eixo neutro plástico da área efectiva da chapa perfilada

e - eixo neutro elástico da área efectiva da chapa perfilada

P_i - carga aplicada no instante i

z_i - braço do binário de forças tração-compressão no instante i

M_{ri} - momento resistente do perfil solicitado no instante i

s_i - escorregamento no topo da nervura no instante i

y_{csi} - comprimento da fissura no betão no instante i

Capítulo 1- Introdução

1.1- Motivação

O sistema construtivo misto é formado por dois materiais ligados entre si através de uma superfície de contacto que garante o comportamento solidário do elemento estrutural [5].

Os elementos estruturais mistos de aço e betão permitem não só reforçar soluções existentes, como por exemplo, pilares em betão armado, cintando-os com secções metálicas, mas também construir estruturas novas, como por exemplo vigas mistas formadas por perfis metálicos associados a lajes de betão, que são dimensionadas como banzo superior e almas de vigas mistas, com capacidade resistente superior à da secção metálica isolada.

A construção de lajes em betão armado envolve a preparação e aplicação de materiais cofrantes que, após a construção, são em parte, desperdiçados ou destruídos. O sistema construtivo misto aço betão responde a esta temática com “lajes colaborantes” executadas com chapas de aço perfiladas e betão. Neste tipo de lajes, o aço é utilizado como cofragem perdida com função estrutural, proporciona uma plataforma em fase de construção e permite economizar recursos humanos e materiais.

Em contrapartida, os sistemas construtivos mistos requerem mão-de-obra qualificada na sua execução, na medida em que envolvem processos tecnológicos de serralharia nomeadamente soldadura, quinagem e enformação de materiais.

1.2 - Enquadramento histórico do tema

A primeira construção de lajes mistas regista-se em 1920. Esta primeira experiência utilizava uma chapa de aço como cofragem, perdida para a laje de betão armado [4][5]. Este sistema construtivo não era vantajoso face às lajes correntes de betão armado, uma vez que o custo de construção era maior, relativamente ao tradicional. Apesar da ineficiência do sistema construtivo, iniciaram-se investigações científicas com o objetivo de maximizar a eficiência da utilização do material aço.

Em 1926 foi patenteado um sistema de lajes mistas no qual toda a resistência da laje era obtida a partir do perfil metálico e em que se utilizava o betão para garantir a segurança contra incêndios e como superfície de regularização [4].

Em 1950, nos Estados Unidos da América a empresa “*Gano Steel Products*” produziu a primeira chapa com perfil trapezoidal para execução de lajes mistas. Para além da geometria revolucionária do perfil, possuía rede electrosoldada aplicada na face superior para garantir uma boa ligação aço-betão. Este modelo de chapa perfilada foi designada de “Cofar”[4][5].

No ano de 1961, a empresa “*Inland-Ryerson*” produziu a primeira chapa perfilada com características próximas das existentes atualmente. A chapa tinha perfil trapezoidal e era dotada de deformações nas almas, que teriam a mesma função da rede electrosoldada utilizada anteriormente. Esta chapa perfilada foi denominada de “HiBond” [4]. O sistema construtivo resultou em investigação e foi precursora das atuais chapas perfiladas.

No ano de 1980, surgiu a necessidade de desenvolver regulamentação adequada à verificação da segurança de lajes colaborantes. Em consequência, o Instituto Americano do Ferro e do Aço (AISI) iniciou, em 1967, uma investigação na Universidade do estado do Iowa (ISU), sob a direção de Carl Ekberg, ao qual se juntou Max Potter, com o objetivo de desenvolver métodos de verificação da segurança para lajes mistas com aço e betão [4]. Foram ensaiadas lajes à flexão a fim de determinar os tipos de colapso e a capacidade resistente deste sistema construtivo. Verificou-se que o tipo de colapso mais frequente é por rotura da ligação aço-betão segundo a interface, manifestando-se por fissuras oblíquas no betão e próximas das zonas de aplicação da carga (Figura 1). Como consequência destas fissuras, perde-se a ligação entre a chapa perfilada e o betão, os materiais escorregam relativamente (deslocamento visível no topo do vão), Figura 1, e a estrutura deixa de ter comportamento misto [3].

No último quarto do século XX, foram publicados os primeiros artigos relativos ao dimensionamento de vigas e lajes mistas aço-betão que levaram à elaboração de normas, nomeadamente a ANSI/SDI C1.0 e posteriormente a ASCE 3-84, tendo sido referidas algumas problemáticas deste tipo de estruturas,

nomeadamente a influência do escorregamento entre materiais na resistência e na deformação[4].

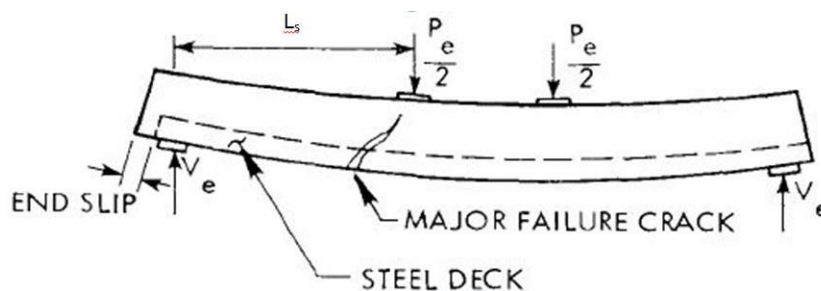


Figura 1 Rotura por corte longitudinal na interface aço-betão (adaptado [3])

1.3 - Objeto de estudo

O presente trabalho de investigação estuda lajes mistas constituídas por uma chapa metálica perfilada inferior, sobre a qual é aplicada uma camada de betão armado, com ligação mecânica através da interface. A principal vantagem da solução deriva da utilização da cofragem como parte integrante da estrutura e dos varões de aço utilizados terem geometria simples, proporcionando maior velocidade de construção e reduzida necessidade de mão-de-obra [5].

A resistência à flexão durante a betonagem é proporcionada pela chapa de aço perfilada, quinada e enformada a frio, oferecendo também uma plataforma de trabalho estável, nomeadamente para a instalação de conectores soldados e colocação de armaduras. Nesta fase, o perfil é escorado e dimensionado para resistir ao peso próprio do betão fresco. Num comportamento misto à flexão, recorre-se ao betão para resistir à compressão e à chapa perfilada de aço estrutural para resistir à tração.

Existem vários tipos de chapas perfiladas para lajes mistas, com diferentes geometrias e métodos de ligação ao betão. Podem ser agrupadas em: chapas de perfil trapezoidal e chapas de perfil reentrante (Figura 2). As chapas são galvanizadas em ambas as faces, têm, em geral, espessura compreendida entre 0,75 mm e 1,50 mm e apresentam tensões de cedência da ordem de 250 MPa e 450 MPa.

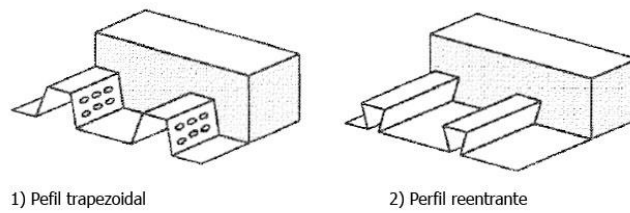


Figura 2 Tipos de chapas perfiladas (adaptado [2][1])

A segurança de uma laje mista aço-betão deverá estar garantida tanto em fase construtiva como em fase de utilização.

Em fase construtiva, a chapa metálica perfilada tem também função de cofragem. Assim, a segurança do perfil relativamente aos estados limite últimos de resistência deve ser garantida juntamente com o controlo das deformações. A segurança da chapa perfilada é avaliada para esforço de corte transversal, flexão, interação flexão-corte, encurvadura das almas e limita-se a flecha máxima [5].

Em utilização, o betão e o aço funcionam solidariamente e verifica-se a segurança aos estados limite últimos e aos estados limite de utilização. Nesta fase, deverão ser consideradas as ações permanentes e variáveis, num sistema estrutural sem escoramento [5].

No dimensionamento de lajes mistas, a limitação da deformação e a resistência da interface são as condições mais restritivas[5][9]. No dimensionamento para estados limite últimos deverão ser também avaliados os seguintes modos de colapso [5]:

1. Colapso tipo 1- A rotura do elemento estrutural deve-se a “**flexão excessiva**”, ou seja, o momento fletor atuante de cálculo é atinge o limite do momento fletor resistente, $M_{Ed} = M_{Rd}$.

2. Colapso tipo 2 - A rotura deve-se ao “**corte longitudinal excessivo**”, ou seja o esforço de corte longitudinal atuante na interface aço-betão atinge a resistência da conexão, $V_{l,Ed} = V_{l,Rd}$.

3. Colapso tipo 3 - A rotura do elemento construtivo deve-se a “**corte transversal excessivo**”, ou seja, o esforço transversal atuante de cálculo atinge o esforço transversal resistente, $V_{Ed} = V_{Rd}$.

Podem ser analisados vários perfis de chapas metálicas colaborantes, de diferentes fabricantes. Apesar de todas elas apresentarem características técnicas diferentes quanto à geometria, (inclinação das almas, largura de módulo, altura,

orientação e tipo de “bossas”), são em geral, agrupadas, consoante a inclinação das almas. Classificam-se trapezoidais, as secções com inclinações de alma inferior a 90° (Figura 3a) e reentrantes, as secções com almas inclinadas a mais de 90° (Figura 3b).

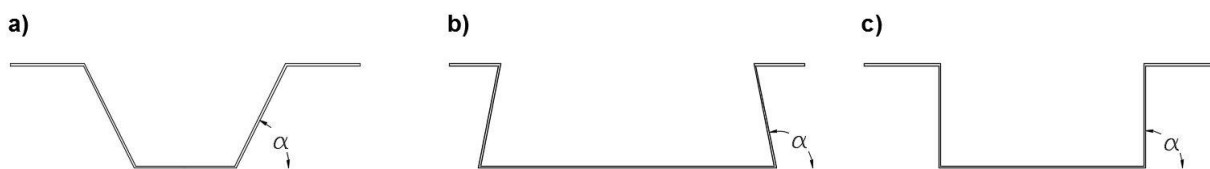


Figura 3 Inclinação de almas das secções tipo

Atualmente não foram encontradas no mercado soluções com almas verticais, inclinação da alma igual a 90° (Figura 3c), denominadas de secção retangular para o estudo. Assim, este tipo de secção é adicionado às secções estudadas, pretendendo-se compreender o motivo de não serem fabricadas.

Comparativamente, os perfis reentrantes têm maior área de aço que não chega a ser totalmente explorada em colapso tipo 1 em vãos da ordem 3 a 6 m uma vez que a rotura ocorre “prematuramente” por efeito de corte longitudinal na interface aço-betão.

Quanto à geometria das “bossas” em almas de perfis trapezoidais, verificam-se diversas soluções: bossas horizontais, como por exemplo na chapa perfilada HAIRCOL 59s, (Figura 4)[31], e “bossas” inclinadas com diversos ângulos e relevos, por exemplo na chapa perfilada Cofraplus 60[32], (Figura 5). Verifica-se que, as bossas inclinadas são frequentemente distribuídas anti-simetricamente em relação ao eixo longitudinal do módulo de chapa. Quanto às chapas com perfil reentrante, não foram encontradas soluções com bossas cunhadas nas almas, encontrando-se apenas bossas em banzos superiores ou inferiores, como por exemplo na chapa perfilada ComFlor 51 (Figura 6)[33]

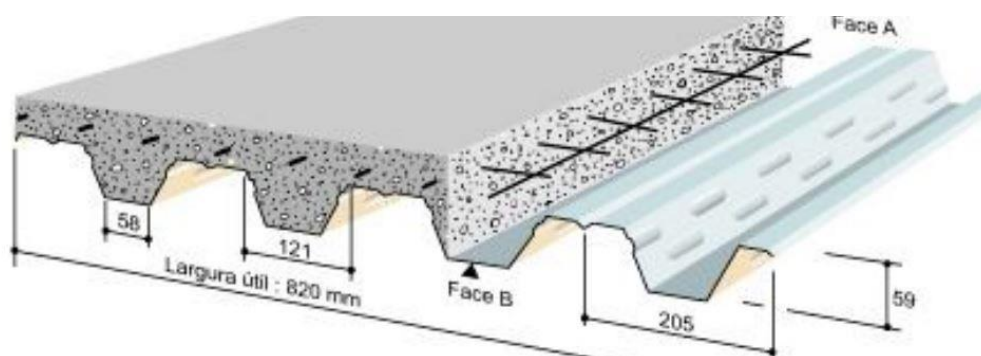


Figura 4- Chapa perfilada HAIRCOL 59s (adaptado [31])

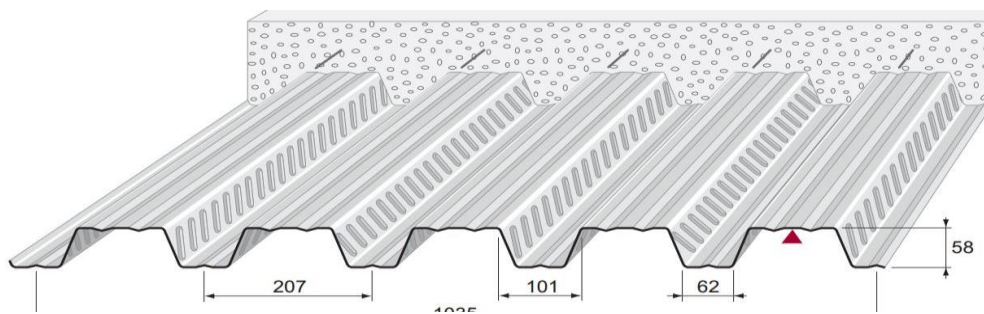


Figura 5- Chapa perfilada Cofraplus 60 (adaptado [32])

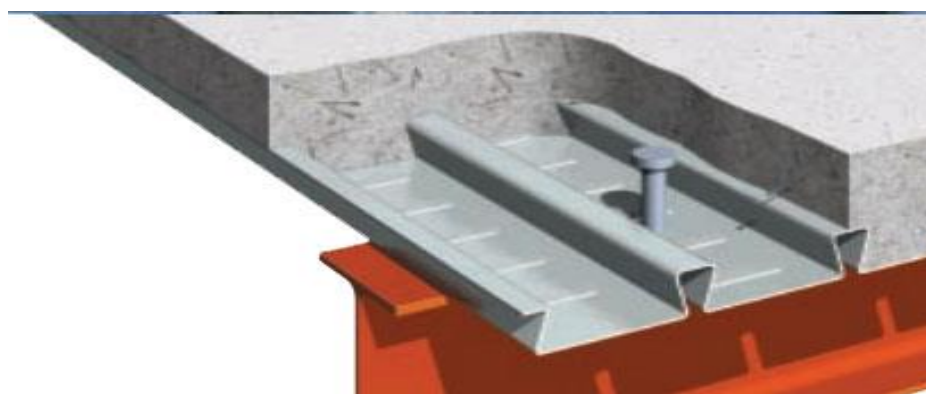


Figura 6- Chapa perfilada ComFlor 51 (adaptado [33])

Da recolha bibliográfica constata-se que existem fabricantes que não fornecem a totalidade da informação necessária ao dimensionamento das lajes mistas que fabricam, nomeadamente os parâmetros característicos da resistência ao corte longitudinal, limitando-se a apresentar fichas técnicas de soluções pré-concebidas.

1.5 - Objetivos

O presente estudo tem como objetivo descrever o comportamento de lajes mistas de betão sobre chapa de aço colaborante.

Pretende-se identificar os métodos de rotura mais usuais, analisar as suas causas e compreender o fenómeno. Paralelamente, pesquisam-se soluções construtivas disponíveis no mercado para este tipo de elementos estruturais e assinalam-se as diferenças no comportamento estrutural dos vários tipos de chapa colaborante.

Tendo por base uma secção trapezoidal fornecida, pretende-se caracterizar o comportamento dos vários tipos de soluções recorrendo ao método dos

elementos finitos (FEM), com o objetivo de descrever os estados de tensão na zona de interface, para os vários tipos de chapas.

Com base na análise linear elástica de tensões pelo método dos elementos finitos (FEM), determinam-se as tensões e as direções principais de tensão na interface entre o aço e o betão, para o tipo de chapa trapezoidal. Por integração de tensões pretende-se propor um modelo de escoras e tirantes que descreva o equilíbrio de forças existente neste tipo de sistema construtivo, nomeadamente ao nível do banzo inferior.

Para além da análise numérica pretende-se realizar uma análise experimental. Serão construídos provetes com base na secção trapezoidal disponibilizada por um fabricante e com uma solução alternativa, para a interface, proposta no presente estudo. Os provetes são ensaiados, pretendendo-se comprovar a viabilidade da solução proposta.

1.6 - Organização do trabalho

O trabalho de investigação está dividido em seis capítulos, ao longo dos quais se faz referência às fontes bibliográficas que sustentam todo o processo de investigação.

No presente capítulo apresenta-se a motivação que levou à escolha deste tema e apresenta-se o objeto de estudo.

No segundo capítulo desenvolve-se a recolha bibliográfica e sintetiza-se a informação mais relevante para o trabalho.

No capítulo número três apresenta-se a metodologia a aplicar no na investigação.

No quarto capítulo aplica-se a metodologia numérica, desenvolvendo modelos virtuais e apresentam-se os resultados. Com base nos resultados obtidos propõe-se uma nova solução para a temática em estudo.

No penúltimo capítulo aplica-se a metodologia experimental, construindo corpos de prova com o objetivo de comparar a solução existente com a proposta.

No último capítulo conclui-se sobre a investigação desenvolvida e propõem-se temáticas para futuros trabalhos

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica

2.1 - Composição e comportamento

2.1.1 - Ligação aço-betão

Um elemento estrutural misto aço-betão é formado por componentes destes materiais interligados. Para que a secção tenha comportamento solidário, é necessário assegurar que a resistência da conexão entre a chapa metálica perfilada e o betão endurecido garanta interação total e que esta não é o componente crítico da solução construtiva.

Estudando a interface, distinguem-se os conceitos conexão e interação [5]:

- A **conexão** define-se como o sistema utilizado para garantir que os dois materiais trabalhem solidariamente e está diretamente relacionada com a força longitudinal resistente da interface, (Figura 7).
- A **interação** caracteriza o elemento estrutural quanto ao deslocamento entre os materiais aço perfilado e betão, (Figura 8).

A interação e conexão são dependentes um do outro, na medida em que um elemento estrutural com elevado grau de conexão apresenta resistência ao corte longitudinal para garantir que a rotura não será devida ao escorregamento entre os materiais. Em um sistema construtivo com conexão parcial, verifica-se também interação parcial. Neste caso, espera-se que a rotura do elemento estrutural se deva a falência da conexão, permitindo escorregamento entre os materiais, embora os materiais aço e betão sejam parcialmente explorados em flexão. Soluções estruturais com conexão nula conduzem também a interação nula e os materiais não têm comportamento solidário.

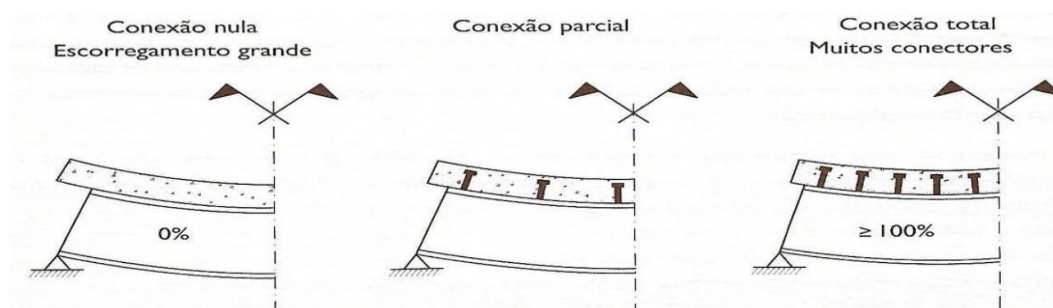


Figura 7 Influência do grau de conexão (adaptado [5])

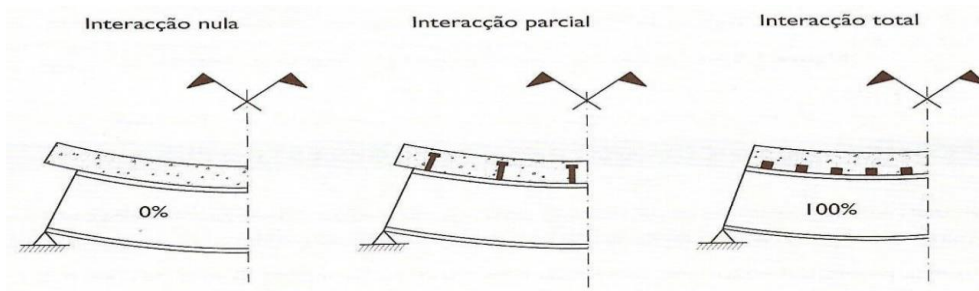


Figura 8 Influência do grau de interação (adaptado [5])

2.1.2 - Forças na interface aço-betão

Um elemento misto com conexão nula, desprezando a aderência química entre os dois materiais, não é solidário. Assim, ambos sofrem compressões e trações quando solicitados em flexão e verificam-se deslocamentos relativos entre os materiais (interação nula). Esta situação é indesejável para os elementos estruturais mistos, na medida em que a resistência global é equivalente à do material isolado mais resistente. Deste modo, pretende-se conceber estruturas com comportamento próximo da conexão total, garantindo que os materiais trabalham em conjunto e o diagrama de tensões, quando solicitado à flexão, seja próximo do bi-triangular, (Figura 9), garantindo uma interação total ou elevada.

Verificando comportamento solidário na secção, o grau de conexão é elevado e conseqüentemente a interação é próxima da total, sendo então viável estudar-se a interface em comportamento elástico linear, até à fissuração do betão.

O fluxo de corte longitudinal, q , pode ser determinado ao longo da superfície de contacto pela seguinte expressão [20][21]:

$$q(x) = \frac{V(x) \cdot S}{I}$$

Expressão 1 fluxo de corte longitudinal

Em que:

$V(x)$ é o esforço transversal atuante no vão

S é o momento estático da secção homogeneizada em relação ao eixo neutro (e.n.) elástico

I é a inércia da secção homogeneizada

A Expressão 1 demonstra que o corte longitudinal atuante é diretamente proporcional ao esforço de corte transversal. Aumentando a carga aplicada, impõe-se maior esforço de corte na secção transversal e conseqüentemente a

rotura dar-se-á pela interface. é expectável que uma diminuição em 50% da resistência ao corte longitudinal (por escorregamento entre os materiais) provoque uma redução da capacidade resistente da laje em 50% [6].

Caso os dispositivos de conexão tenham capacidade para resistir à força de corte na interface, $q(x)$, o elemento estrutural atingirá a sua resistência máxima e estará em conexão total. Se, contrariamente, os conectores forem insuficientes para resistir à força de corte, $q(x)$, então a resistência do elemento será limitada pela resistência da conexão e o elemento encontrar-se-á em conexão parcial.

Devido à deformabilidade dos conectores, quando o elemento estrutural é solicitado em flexão, verificar-se-ão deslocamentos relativos entre os materiais, influenciando a rigidez e a deformação do elemento estrutural. Se os conectores forem resistentes, mas simultaneamente flexíveis, o elemento estrutural atinge a sua resistência máxima em interação parcial. Se, por outro lado, os conectores forem rígidos, a deformação do elemento será desprezável, e verifica-se conexão total. Conclui-se então que o comportamento estrutural do elemento está diretamente relacionado com a resistência e a rigidez da conexão existente entre a chapa perfilada e o betão[5].

O comportamento de lajes mistas de aço e betão e a intensidade das forças de corte longitudinal estão relacionados com a geometria da chapa perfilada e com a distribuição dos elementos conectores [3][5] [18][19].

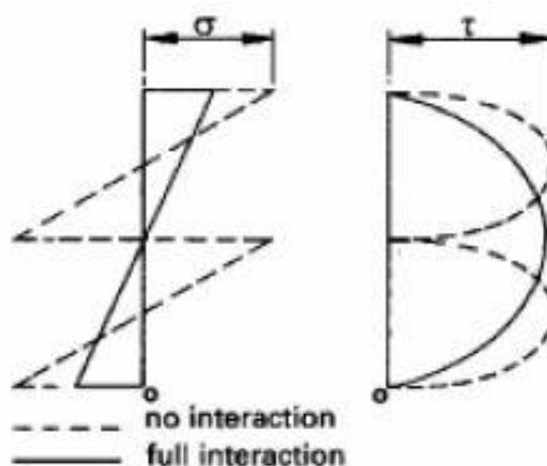


Figura 9 Diagramas de tensão normal (esquerda) e tangencial (direita) para secções mistas com interação total e nula (adaptado [25])

2.1.3 - Interface aço-betão

O colapso tipo 2, devido a corte longitudinal excessivo na interface aço betão é um tipo de rotura ineficiente de laje, pois os materiais aço e betão não são explorados para resistir à flexão[17]. Através de ensaios de flexão, concluiu-se que a resistência global de lajes colaborantes depende do desempenho da interface, pois é esta que estabelece o comportamento solidário dos materiais [6][7][9][10][11][12] [13][17][18]. Para ligar os materiais aço e betão, a superfície da chapa perfilada é munida de deformações plásticas, produzidas por equipamento industrial de punção, ao longo das almas e com orientações, espaçamento e relevo diversos. As deformações são correntemente denominadas de bossas, tendo a função de conferir à secção resistência ao corte longitudinal ao longo da interface aço-betão. Contudo, as bossas não devem ter resistência suficiente para conduzir as lajes a comportamento frágil [5]. Na Figura 10 apresenta-se um exemplo de rotura por corte longitudinal excessivo com comportamento dúctil.

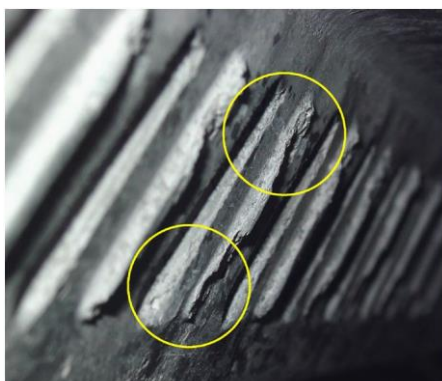


Figura 10 Rotura por corte longitudinal - interface após ensaio de flexão (adaptado [17])

A função das bossas é idêntica à função das corrugações do aço estrutural em barras, utilizado em elementos de betão armado correntes, apesar de o mecanismo de resistência ser diferente. No betão armado, as corrugações transformam o escorregamento longitudinal em compressão radial no aço e tração radial no betão [17][24]; já nas lajes mistas, as bossas travam o escorregamento entre os materiais, fenómeno vulgarmente denominado por “efeito de cunha”, e decompõe-se em forças de tração na chapa perfilada e forças de tração no betão confinado entre almas, que provoca flexão local nas almas da chapa perfilada. Este esforço tem impacto na resistência global da laje, na medida em que, ao

verificar-se flexão das almas, o “efeito de cunha” das bossas é anulado e consequentemente a resistência ao corte longitudinal é anulada. (Figura 11 [17]).

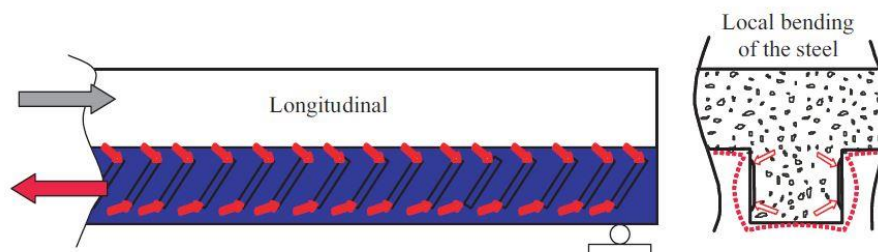


Figura 11 - Esquema do mecanismo de resistência ao corte longitudinal (adaptado [17])

Nos ensaios de flexão descritos na bibliografia, verifica-se que os materiais tendem a separar-se verticalmente, sendo este fenómeno vulgarmente denominado de “separação vertical, o qual se deve à diferença das rigidezes dos materiais aço e betão, [25] que lhes confere deformabilidades diferentes.

Considere-se o exemplo da Figura 12: seja AB uma viga de vão L sujeita a uma carga uniformemente distribuída, w , apoiada sobre outra viga, CD com vão $5L$, no quinto central do vão. A rigidez da viga AB é dez vezes maior que a da viga CD.

Não havendo escorregamento nos apoios da viga AB, os pontos de carga da viga CD serão sempre A e B. Dado que a viga CD é menos rígida que a AB, deformar-se-á mais, e para compatibilizar a deformação do ponto A com o ponto B as fibras superiores da viga CD tendem a afastar-se das fibras inferiores da viga AB. Consequentemente, o deslocamento vertical relativo entre as vigas vai aumentar.

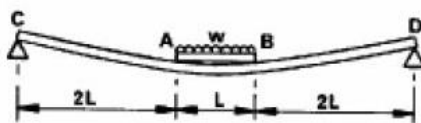


Figura 12 Exemplo de separação vertical (adaptado [25])

Analogamente ao fenómeno descrito no exemplo de duas vigas, os materiais das lajes mistas solicitadas à flexão também tendem a separar-se, pois o betão é mais rígido que a chapa perfilada [25]. As forças de separação vertical não têm expressão relativamente às de corte longitudinal, e normalmente são desprezadas [25].

A capacidade resistente da laje não é afetada pelo tipo de ancoragem sobre o apoio, sendo que o único parâmetro relacionável com a resistência ao corte

longitudinal é o coeficiente de atrito da chapa perfilada, que influencia a tensão resistente na interface, τ_u [13][25].

O escorregamento entre os materiais resulta na perda de comportamento misto da secção ao longo do vão de corte, L_s , (comprimento entre apoio e a carga concentrada) [3], isto é, o betão separa-se da chapa perfilada e deixam de se comportar como uma só secção, sendo este fenómeno controlado pelas bossas da chapa perfilada.

Em lajes mistas sem conectores nas extremidades, a resistência máxima é atingida imediatamente antes de se verificar escorregamento entre os materiais. No caso de a laje ser munida de conectores, a ligação é dúctil e a resistência máxima é atingida depois de se iniciar o escorregamento entre os elementos [10].

2.1.4 - Formas de conexão

A conexão entre materiais, aço e betão, pode ser realizada de diversas formas:

- Aderência
- Atrito
- Conectores de corte
- Interligação

Os conectores são elementos em aço que permitem a conexão entre os materiais mecanicamente. Podem ser incorporados nos perfis metálicos/chapas perfiladas com solda ou cravados. As soluções mais correntes são pernos de cabeça, dado não interferirem significativamente na colocação de armaduras no betão, contrariamente a outros conectores como as cantoneiras, os varões de aço dobrados em forma de U, os blocos de aço soldados ao perfil ou os *perfobond* (Figura 13).

Apesar de os conectores cravados terem menor resistência ao corte, implicando a maior quantidade de elementos em relação aos conectores soldados, estes apresentam algumas vantagens nomeadamente a nível de controlo de execução do trabalho: a proteção dos perfis de aço não é alterada (por exemplo a galvanização das chapas perfiladas) e não é necessária eletricidade na execução.

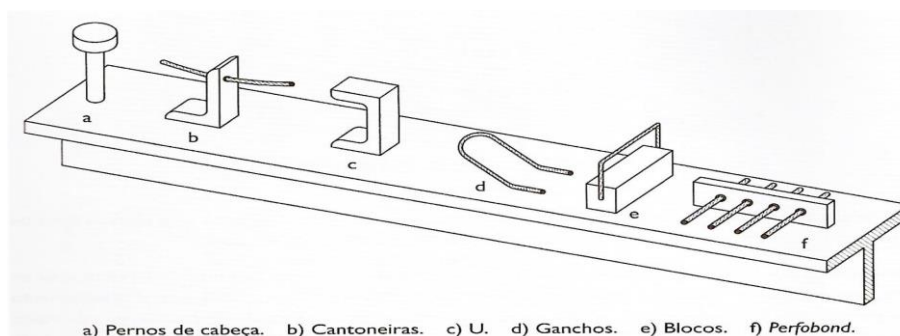


Figura 13 - Tipos de conectores (adaptado [5])

A resistência por atrito e aderência é apenas mobilizada em lajes mistas com chapa perfilada e em colunas mistas.

No caso das chapas perfiladas, não se recorre a conectores para resistir ao esforço de corte longitudinal. Assim, promovem-se os fenómenos de atrito e de interligação, aumentando a superfície de contacto entre os materiais (maximizando a força de atrito) ou deformando os perfis com entalhes e indentações (maximizando a interligação).

Uma vez que a resistência ao corte longitudinal da laje mista aço-betão depende da combinação de várias componentes como a aderência, o atrito, a interligação, a classe de resistência do betão [11]) e ainda da geometria da chapa perfilada, é complexo determinar a capacidade resistente da conexão, comparando com conexões munidas de conectores, como por exemplo em vigas mistas.

O método experimental revela a existência de três tipos de mecanismos de transferência de corte longitudinal ao longo da interface aço-betão [14]:

- Aderência química - refere-se à capacidade da pasta ligante do betão em aderir à superfície metálica (sem bossas) da chapa perfilada
- Conexão mecânica - descreve o fenómeno de ligação entre as bossas e o betão curado, devido à capacidade de o betão fresco se moldar à superfície de cura, “vulgarmente denominado de efeito de cunha”.
- Conexão friccional - relaciona-se com o comportamento material do betão. Devido ao efeito de Poisson, quando um volume de betão é submetido a esforço, deforma-se, encurtando segundo o eixo solicitado e expandindo-se

segundo os eixos ortogonais. Este efeito gera forças friccionais, na interface aço-betão, que promovem a resistência ao corte longitudinal.

Quanto ao efeito da aderência química da pasta ligante, este é desprezável, na medida em que conduz a uma rotura frágil e não tem expressão na resistência da interface, pois colapsa numa fase inicial do carregamento (Figura 14).

A interação mecânica é o fenómeno que confere a maior parcela da resistência à interface, embora existam bossas de diversas dimensões, relevos, espaçamentos e inclinações e a resistência de cada solução seja variável.

As forças geradas pela ação friccional requerem o controlo do efeito de separação vertical entre os materiais, característica típica de perfis reentrantes.

Análises paramétricas com recurso a modelos de elementos finitos que estudaram a influência das características mecânicas dos materiais na carga máxima de serviço no meio vão para deformações equivalentes a $L/250$, na carga máxima de rotura e correspondente interação revelam que os parâmetros com maior expressão são o tipo e local de carregamento (alteram o comprimento do vão de corte, L_s). Contrariamente, a resistência à compressão e módulo de elasticidade do betão não afetam significativamente a resistência da laje mista [15].

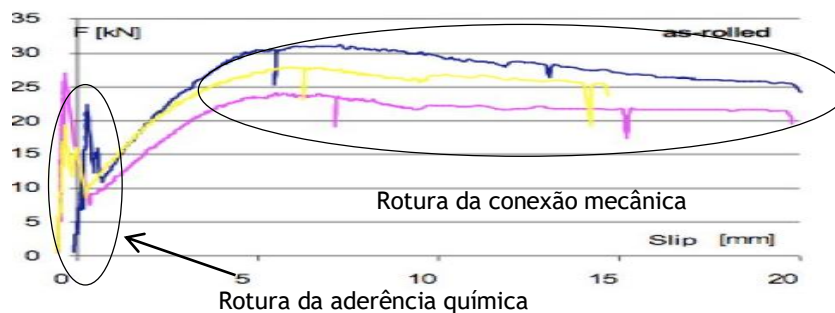


Figura 14 - Ensaio de flexão, gráfico de Carga vs Escorregamento (adaptado[11])

2.1.5 - A conexão mecânica e o mecanismo de rotura

A interface do elemento é condicionante para a rotura da laje, devendo esta ser avaliada quanto ao seu comportamento e à sua resistência. Contudo, o processo não é simples na medida em que o comportamento da conexão não é linear e depende da geometria do perfil e das próprias bossas [4][6][7][9][14][18].

Pelo conceito de fricção de Coulomb¹ a conexão pode ser caracterizada pelo coeficiente de atrito, μ , que traduz a crespidão da chapa perfilada. Assim, quanto maior for este parâmetro, mais resistente será a interface e, conseqüentemente, maior será a resistência ao corte longitudinal mobilizada pela interface.

A resistência da conexão é determinada experimentalmente por ensaios de flexão (método m-k, método da conexão parcial), ensaios de escorregamento (slip-block) ou ensaios de arranque (pull-out).

Os ensaios experimentais de flexão permitem ainda determinar o comportamento da conexão. A conexão de lajes mistas sem bossas apresenta um comportamento frágil, ao passo que a sua introdução, ao melhorar a conexão, permite a aquisição de um comportamento dúctil [5].

Os ensaios de flexão evidenciam o mecanismo de rotura por corte longitudinal. Com carga vertical crescente, é audível a rotura da aderência química entre a chapa perfilada e o betão, resultando numa leve fissura ao longo da interface. Posteriormente, formaram-se pequenas fissuras na parte inferior do betão e próximas dos pontos de carregamento, (Figura 15a, seguidas de pequenos escorregamentos que revelam a sollicitação da conexão mecânica. Finalmente, observa-se o aumento da abertura e do comprimento das fissuras e surgem novas fissuras ao longo da zona central do vão (entre cargas), (Figura 15b, levando ao escorregamento perceptível nas extremidades do corpo de prova [10].

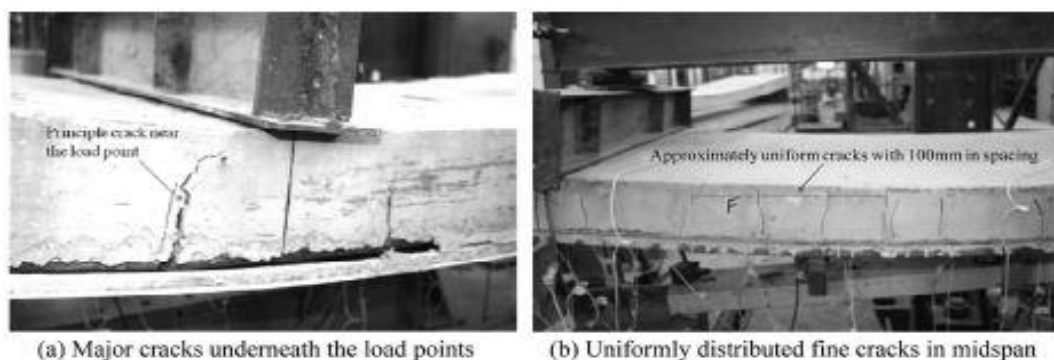


Figura 15 Fissuração em ensaios de flexão (adaptado [10])

¹ A interface entre dos materiais é descrita pelo coeficiente de atrito, μ , que traduz o rácio entre a força horizontal, H , que provoca deslocamento relativo ao longo da superfície de contacto e a força vertical, V . Assim: $\mu = H/V$. O coeficiente de atrito, μ , relaciona-se com a rugosidade da interface, pois para uma força vertical, V , constante, quanto mais rugosa for a interface, maior será a força horizontal, H , necessária para provocar deslocamento entre os materiais [22].

2.1.6 - Análise paramétrica da interface aço-betão

A interface de cada laje mista é única [9][10][14][18][19], pois o coeficiente de atrito, μ , da interface depende não só de características mecânicas (esbelteza e geométricas do perfil), mas também das condições de construção como: temperatura do betão fresco, perfil de aço e ambiente, humidade relativa, processo de cura do betão, natureza e forma dos agregados...

Ensaio laboratoriais e modelos de elementos finitos comprovam que a resistência ao corte longitudinal é afetada pelo coeficiente de atrito, μ , da interface aço-betão, demonstrando assim a necessidade de estudar o mecanismo de transferência de cargas ao longo da interface, com o objetivo de propor soluções mais eficientes [17][14][9].

Devido à interação entre os materiais betão e aço, geram-se forças de contacto que têm que ser equilibradas internamente pela conexão para que o esforço seja encaminhado para a chapa perfilada. A geometria simétrica das nervuras do perfil permite que as componentes horizontais se autoequilibrem entre nervuras. No entanto, as componentes verticais tendem a provocar separação vertical entre os materiais pela interface, isto é, o betão junto das bossas fissa horizontalmente e os materiais separam-se. Para resistir a estas forças, confere-se às almas um ângulo de retenção (no caso de secções reentrantes) que permite equilibrar a componente vertical das forças de contacto, este efeito do ângulo de retenção é ajudado pelo peso próprio do betão [17]. No caso de chapas perfiladas de perfil reentrante, a própria geometria do perfil garante a existência de um ângulo de retenção que permita o equilíbrio. A inexistência de ângulo de retenção ou a suavização da inclinação leva à diminuição da resistência da secção.

As forças de interação entre o aço e o betão concentram-se nas extremidades das bossas (superiores ou inferiores), dependendo da orientação do escorregamento e do relevo das bossas (para o interior ou exterior da secção), (Figura 16 [17]). Este facto confere uma resistência irregular entre nervuras, proporcionando um mecanismo de escorregamento ineficiente. O mecanismo de resistência pode ser melhorado, alternando o relevo das bossas, entre o interior e exterior da secção. Assim, as forças de interação concentram-se na extremidade inferior das bossas de relevo para o interior (positivo) da secção e na extremidade

superior das bossas de relevo para o exterior (negativo) da secção. Existem sempre forças em ambas as extremidades das almas do perfil, o estado de tensão da secção é uniforme e a resistência das nervuras é idêntica, pelo que, a resistência ao corte longitudinal da laje será superior, aumentando a resistência global da laje. A rigidez das almas do perfil é também melhorada, conferindo maior resistência à encurvadura local.

A resistência ao corte longitudinal da secção depende da geometria e dimensões das bossas, pelo que interessa perceber a influência de cada dimensão destes elementos.

O declive da bossa é o aspeto dimensional mais importante das bossas, estando relacionado com o ângulo de retenção mínimo necessário no caso de perfis trapezoidais, para evitar o fenómeno de separação vertical entre os materiais [17]. O aumento da inclinação das bossas promove a resistência ao corte longitudinal exponencialmente: triplicar o declive da bossa implica um ganho aproximado de 600% a 800% na capacidade resistente da conexão [17]. Apesar de ser vantajoso, é especialmente perigoso, dado que o aumento da resistência da bossa vai proporcionar o efeito de descascamento, ou seja, o betão vai fissurar sobre a bossa e o esforço é redistribuído para as bossas adjacentes, que sofrerão do mesmo efeito. Desta forma, todas as bossas sofrerão rotura sequencialmente, conferindo um comportamento frágil à secção. Existe ainda uma outra variável que interfere neste processo: a capacidade dos equipamentos industriais do fabricante.

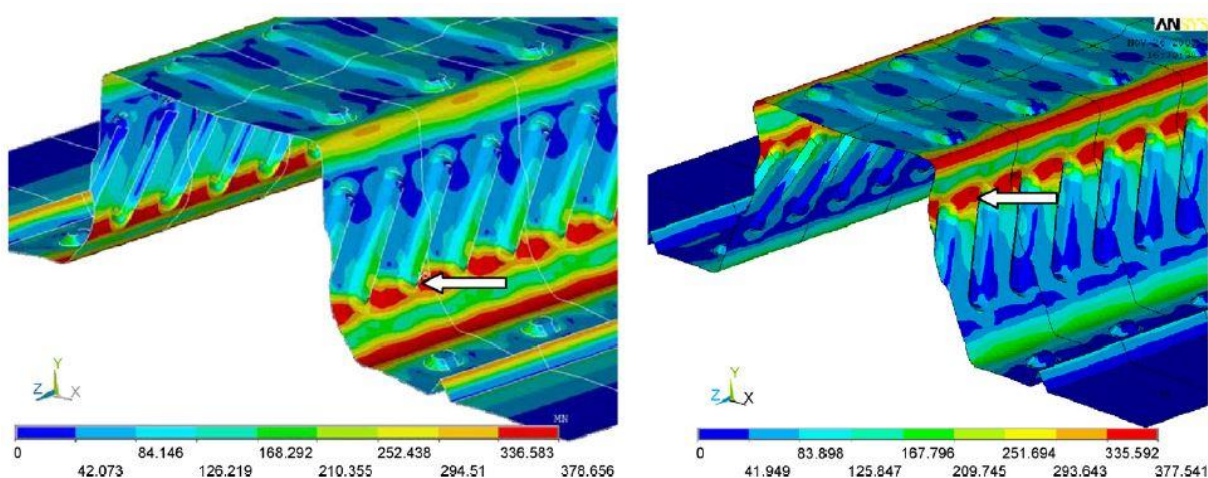


Figura 16 - Mapas de tensões para bossas com relevo positivo e negativo (adaptado [17])

Sendo que a espessura da bossa apresenta uma relação linear com a capacidade resistência da conexão, duplicar a espessura representa um ganho de 60% a 100% na capacidade resistente da conexão [17]. O aumento da espessura da bossa pode revelar-se ineficiente se a tensão de deformação for muito próxima da tensão rotura do aço, sendo que, neste caso, dar-se-á rotura por corte na bossa quando esta for solicitada.

Como foi descrito anteriormente, o escorregamento entre a chapa perfilada e o betão gera forças de interação que se concentram nas extremidades das bossas. O comprimento da bossa determina a zona da alma em que as forças de interação se vão concentrar, de modo a que, quanto mais comprida for a bossa, mais perto dos extremos do perfil será a zona solicitada e mais intensas serão as forças envolvidas [17].

A largura da bossa está diretamente relacionada com a resistência do betão, sendo que, no caso de bossas com relevo negativo, estas são preenchidas com betão. Se as bossas forem estreitas, o betão fissurará pelo nível do perfil e a resistência não se mobilizará. Nas bossas com relevo positivo, este fenómeno de corte no betão também se verifica, apesar de também estar relacionado com o espaçamento entre bossas, já que o betão se deposita entre elas [17]. O aumento da largura da bossa influencia também a rigidez das almas, aumentando a resistência à encurvadura local.

A disposição vertical das bossas é a que aproxima o máximo, as extremidades da bossa dos banzos do perfil, mantendo o comprimento constante. Nesta situação, a resistência do perfil é maximizada [17]. A vantagem de bossas não inclinadas reside no equilíbrio das nervuras devido à simetria da secção, pois as forças de interação vão localizar-se tanto na extremidade superior como na extremidade inferior da bossa (situação que não se verifica em bossas inclinadas).

Quanto ao espaçamento das bossas, há a referir a influência no momento de inércia da secção. Neste sentido, a inércia aumenta quanto menor for o espaçamento entre bossas, bem como a resistência à encurvadura local. Consequentemente, quanto menor for o espaçamento, maior quantidade de bossas terão as almas e maior será a força gerada pelo efeito de cunha [17].

O coeficiente de atrito, μ , é o parâmetro que caracteriza a chapa perfilada quanto ao corte longitudinal e, em última análise, descreve o desempenho da

interface aço-betão. Este parâmetro varia consoante a tipologia e solução de cada fabricante, estando compreendidos entre 0,2 e 0,6 [14][9][10][14]. A resistência ao corte longitudinal demonstra correlação linear com o coeficiente de atrito, μ , pelo que a resistência é triplicada, passando de um extremo ao outro do intervalo [17].

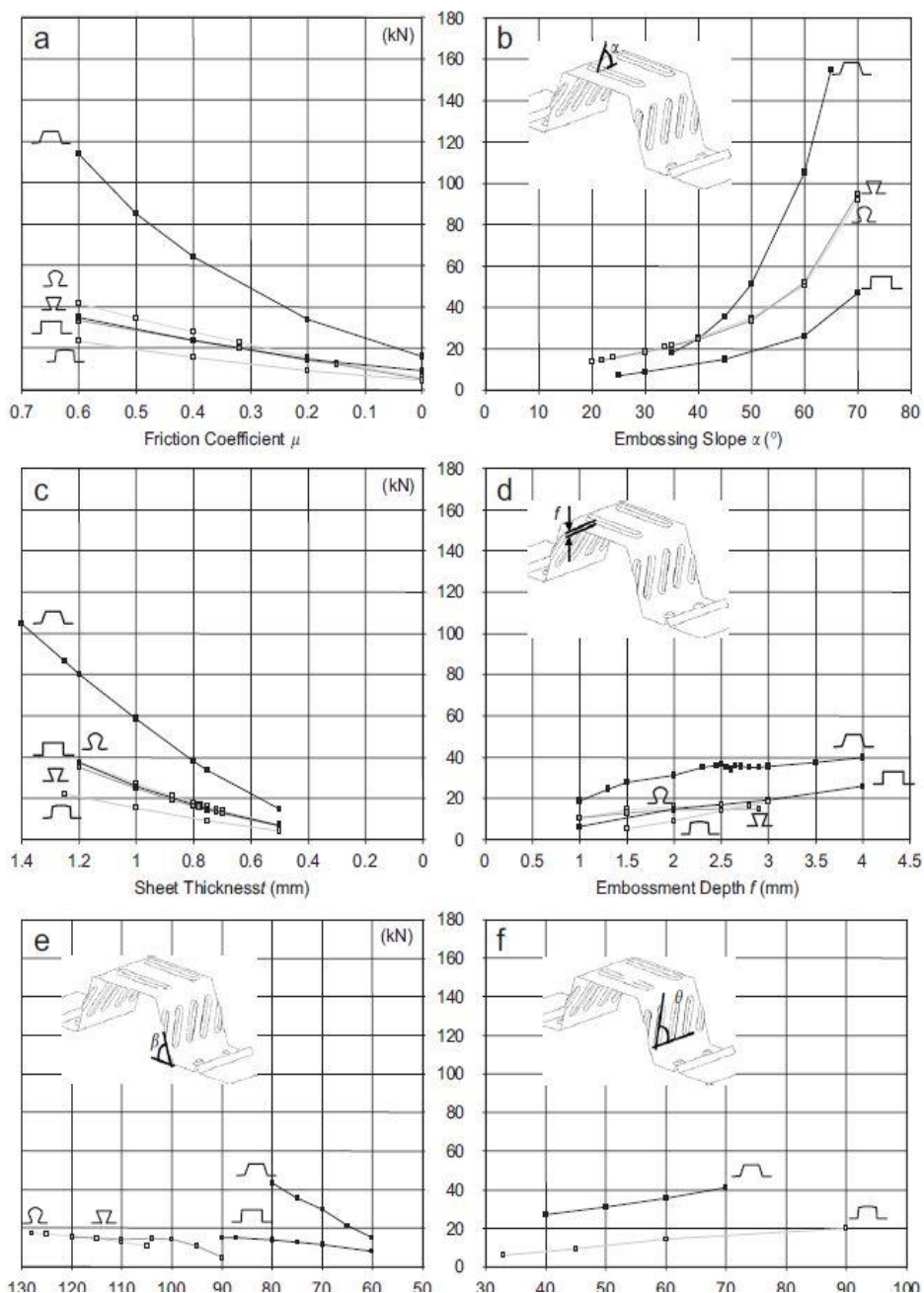


Figura 17 - Influencia de: coeficiente de atrito, μ (a), declive da bossa (b), espessura do perfil (c), espessura da bossa (d), ângulo do perfil (e) e inclinação da bossa (f) na resistência ao corte longitudinal (kN) (adaptado [17])

A espessura do perfil relaciona-se quadraticamente com resistência ao corte longitudinal (Figura 17c). A aproximação linear prevista no Eurocódigo 4 [1]

é conservativa para espessuras compreendidas entre 0,75 e 1,25 mm, (Figura 17c. Assim, parte da resistência da laje não é considerada quando a resistência de lajes com perfil espesso é extrapolada com base em perfis menos espessos [17].

Por outro lado, se as almas da chapa perfilada forem verticais, a componente vertical das forças de interação é menor e maior será o ângulo de retenção [17]. Para perfis trapezoidais, aumentar o ângulo das almas em 20° proporciona um aumento da resistência ao corte longitudinal em aproximadamente 100% (Figura 17e). Já nos perfis reentrantes, não se verifica melhoria significativa, pois o ângulo deste tipo de perfis (100° a 120°) é já suficiente para equilibrar as forças que levam à separação vertical dos materiais.

2.2 - Determinação do esforço de corte longitudinal resistente

2.2.1 - Método “m-k”

Este método semi-empírico foi proposto em 1976 por Porter e Ekberg e utiliza o esforço transversal da laje para determinar a força de corte longitudinal da conexão [3].

O método baseia-se em ensaios de flexão. Prevê ensaiar 6 corpos de prova, divididos em dois grupos, sendo que a diferença entre eles é o vão de corte, L_s . No grupo A, pretende-se maximizar o vão de corte, devendo a rotura ser por corte longitudinal, enquanto que no grupo B pretende-se reduzir o vão de corte, continuando também a garantir uma rotura por corte longitudinal e garantindo um vão de corte superior a $3h$, onde h é a espessura total da laje [5].

Na preparação dos provetes, deve garantir-se que a superfície da chapa perfilada apresenta as características originais de fábrica, a largura deverá ser maior que $3h$ ou 600mm e as lajes deverão ser totalmente escoradas na fase de betonagem, dado que esta é a situação mais desfavorável para a rotura por aderência.

Inicialmente, determina-se a carga de rotura expectável ensaiando um provete de cada grupo em carregamento crescente até à rotura. Assim, determina-se a carga e rotura expectável, W_t , que será um parâmetro necessário ao ensaio dos restantes provetes.

Posteriormente, ensaia-se cada provete com dois carregamentos. O primeiro é cíclico, de intensidade variável entre $0,2W_t$ e $0,6W_t$, durante um

período superior a três horas e com mais de 5000 ciclos de carga. No segundo carregamento, é aplicada carga estática progressivamente crescente, num período superior a uma hora, até atingir a rotura nos provetes. A carga máxima aplicada à laje será W_t verificado, acrescida do peso da laje mista e do equipamento de ensaio.

Durante o ensaio, registam-se a força aplicada, W_t , a flecha da laje, δ , e o escorregamento, s , entre a chapa perfilada e o betão, em intervalos iguais de tempo.

A partir das curvas $W_t - \delta$, pode-se concluir quanto à rigidez da conexão (Figura 18). Para uma conexão dúctil, o esforço de corte vertical, V_t , será $0,5W_t$, em oposição a uma conexão rígida, em que o esforço de corte vertical, V_t , será $0,4W_t$.

Para tratar a informação, divide-se a força de corte vertical, V_t , pelo produto da largura, b , com a altura média do provete, d_p , e divide-se a área da chapa perfilada, A_p , pelo produto da largura do provete, b , com o vão de corte, L_s . Assim, cada provete irá ter um par de valores $(x, y) \rightarrow (\frac{A_p}{b \cdot L_s}, \frac{V_t}{b \cdot d_p})$ que deverão ser representados graficamente (Figura 19).

Posteriormente, determina-se a regressão linear da amostra, que se apresenta na Figura 19 com “1”, e determinam-se os parâmetros matemáticos da reta, o declive e a ordenada na origem. Estes parâmetros têm correspondência direta com os parâmetros característicos do método: o declive da reta é o coeficiente m (N/mm^2), que traduz a capacidade resistente da conexão entre os materiais e a ordenada na origem é o coeficiente k (N/mm^2), que expressa o coeficiente de atrito na interface [12]. Os parâmetros m e k são ainda reduzidos em 10%, contemplando variações entre as condições de ensaio e as de projeto.

Após a determinação dos parâmetros “m-k”, recorre-se à Expressão 1 e determina-se o esforço de corte resistente da conexão dividido por um coeficiente parcial de segurança, $\gamma_{vs} = 1,25$.

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

Expressão 2 Determinação do esforço de corte longitudinal resistente

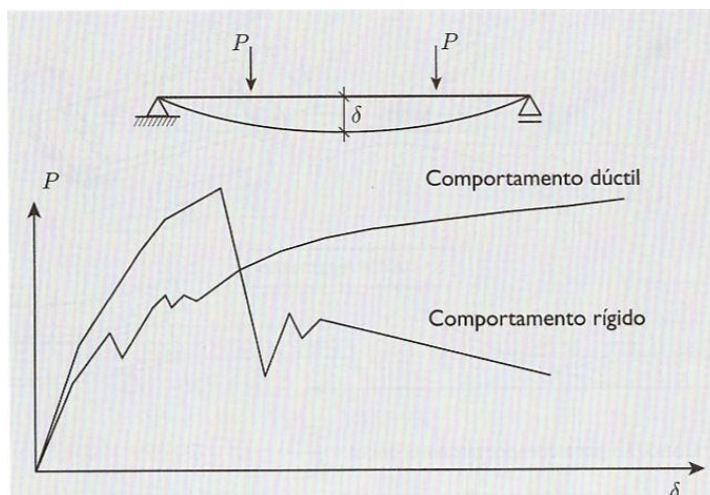


Figura 18 Curvas tipo do comportamento da conexão (adaptado [5])

A regressão linear proposta inicialmente pela ASCE [16] para descrever os resultados experimentais é validada [14] para lajes com vão distintos mas com a mesma secção se o mecanismo de colapso for o mesmo em todos os corpos de prova.

Este método permite determinar o esforço de corte longitudinal resistente na conexão para um tipo de chapa perfilada nas condições de projeto em estudo, dado que os parâmetros “m-k” são característicos do material e os restantes parâmetros podem ser adequados para as soluções em análise, a fim de caracterizar o comportamento da conexão, como frágil ou dúctil (Figura 18).

Apesar de o método “m-k”, (Figura 19) ser utilizado para dimensionar lajes mistas, existem algumas limitações que devem ser tidas em conta [8]:

1. Embora o método considere as características dos materiais, a geometria da chapa perfilada e a conexão entre os materiais, não permite avaliar a influência de cada parâmetro individualmente.
2. A metodologia não é baseada num modelo estrutural, pelo que não permite avaliar o benefício de introduzir varões de aço estrutural, conectores ou deformações da chapa, sem que se realizem novos ensaios laboratoriais.
3. O método de avaliação é igual para conexão frágil ou dúctil, apesar da redução de 20% da capacidade resistente para lajes com conexão rígida.

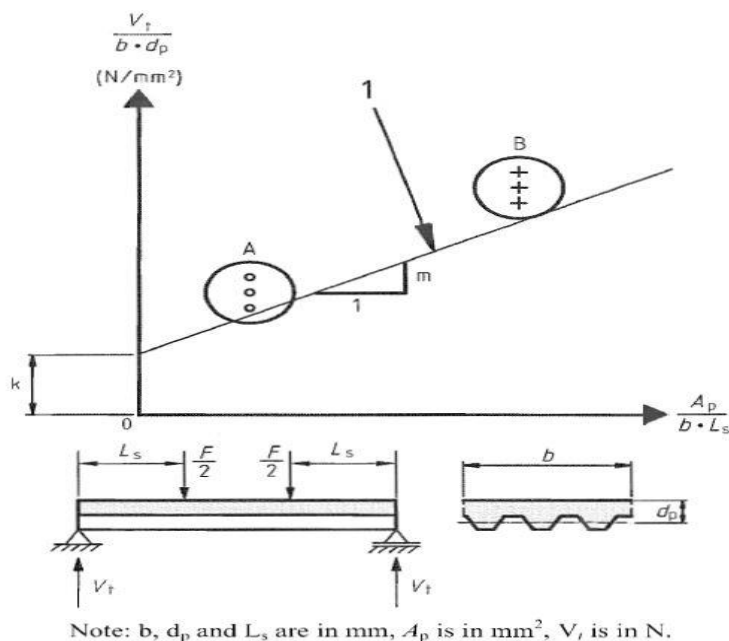


Figura 19 Tratamento de resultados método “m-k” (adaptado [2])

2.2.2 - Método da tensão τ_u ou da conexão parcial

O método da tensão τ_u ou da conexão parcial é uma alternativa ao método m-k, que tem como resultado o momento fletor resistente para a laje mista, tendo em conta uma rotura por corte longitudinal na conexão. No entanto, este é aplicável apenas a lajes com conexão dúctil, embora demonstre melhores resultados em lajes em que uma parte da chapa perfilada é também solicitada à compressão [9]. O método baseia-se no valor de cálculo da tensão última resistente ao corte, $\tau_{u,Rd}$, na interface aço-betão e, contrariamente ao método m-k, permite considerar elementos de amarração nas extremidades da laje (por exemplo, conectores, deformações das nervuras da chapa perfilada) e armadura de reforço [5].

As situações limite analisadas são: laje mista com conexão nula e com conexão total. No primeiro caso, a resistência à flexão da laje será igual à resistência à flexão da chapa perfilada, enquanto que, no segundo caso, conexão total, o betão e a chapa perfilada trabalham solidariamente e a resistência à flexão da laje mista será a da secção mista com a plastificação dos materiais aço e betão.

Numa situação intermédia, com conexão parcial, a resistência à flexão da laje mista depende diretamente da tensão de corte, $\tau_{u,Rd}$, na interface aço-betão. Para determinar esta tensão, τ_u , realizam-se ensaios experimentais nas mesmas

condições que para o método m-k, como foi descrito anteriormente, e relaciona-se com o grau de conexão, η .

Inicialmente, determina-se analiticamente o momento fletor plástico resistente, $M_{pl,Rd}$, e o mínimo entre: a resistência de compressão na camada de betão e a resistência à tração da chapa perfilada, N_{cf} , para a secção em estudo. Experimentalmente, regista-se a carga de ensaio e a deformação verificada na laje para determinar as curvas de interação parcial para a chapa perfilada (Figura 20). Para determinar o grau de conexão, η , a relação entre o momento fletor da laje ensaiada e o momento plástico resistente da secção permite determinar o grau de conexão, η (Figura 20).

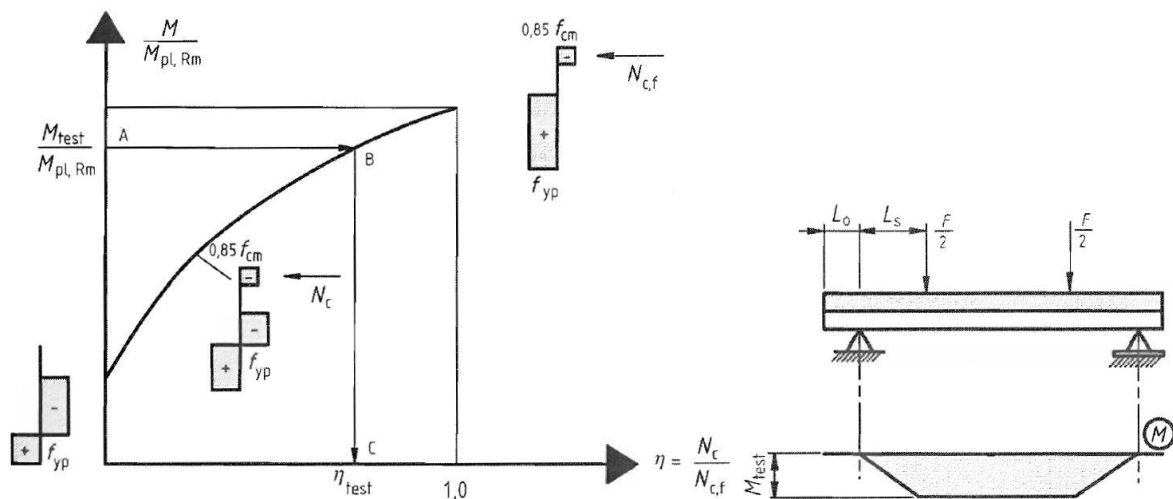


Figura 20 Curva de interação e processo de determinação do grau de conexão, η (adaptado[2])

Após a quantificação do grau de conexão, η , é possível determinar a força de compressão no betão, N_c .

$$\eta = \frac{N_c}{N_{c,f}}$$

Expressão 3 grau de conexão método tu

Em que:

$N_{c,f}$ é a força máxima de compressão no betão em situação de conexão total

N_c é a força de compressão no betão

Após a caracterização da conexão, é possível determinar a tensão última de corte, τ_u , pela Expressão 4.

$$\tau_{u,Rd} = \frac{\eta N_{cf} + \mu V_t}{b(L_s + L_0)}$$

Expressão 4 Determinação da tensão última de corte, τ_u

Em que:

N_{cf} é a força máxima de compressão no betão em situação de conexão total

η é o grau de conexão da ligação

b é a largura da laje

L_s é o vão de corte

L_0 é o vão em consola esquematizado na Figura 20

μ é o coeficiente de atrito no apoio, igual a 0,5

V_t é a reacção no apoio com a carga de ensaio

A parcela μV_t pode ser considerada nula, se for desprezada a resistência adicional devida à reacção de apoio.

Para verificar se a laje se encontra em conexão parcial, determina-se o comprimento a partir do qual a laje se encontra em conexão total, L_{sf} , pela Expressão 5. Caso este seja maior que metade do vão ($0,5 L$), comprimento disponível para resistir ao momento plástico resistente, então a conexão é parcial.

$$L_{sf} = \frac{N_{cf}}{b \tau_{u,Rd}}$$

Expressão 5 Determinação do comprimento de conexão total

Posteriormente determina-se a posição do eixo neutro plástico do betão, Expressão 6:

$$z_{pl,c} = \frac{N_c}{0,85 f_{cd} b} \leq h_c$$

Expressão 6 Determinação do eixo neutro plástico do betão

Em que:

N_c é a força de compressão no betão

f_{cd} é a tensão resistente de cálculo do betão

b é a largura da laje

h_c é a espessura da camada de betão

Por último, calcula-se o momento resistente da secção tendo em conta a rotura por corte longitudinal, Expressão 7, onde se decompõe o diagrama de flexão composta plástica na soma de um diagrama de esforço normal centrado no eixo neutro da área efetiva da chapa perfilada e no centro de gravidade do betão com outro de flexão [1],

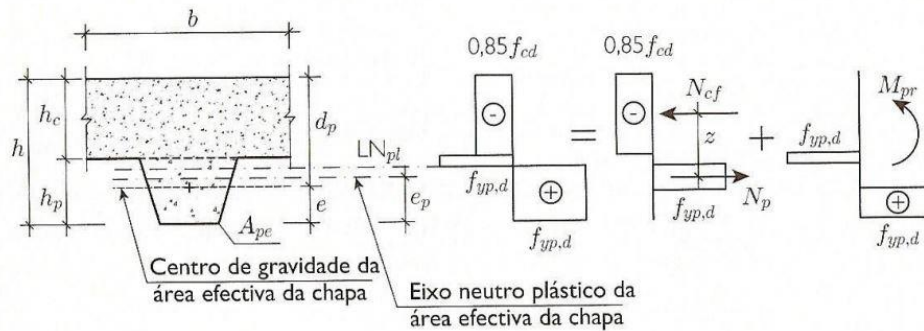


Figura 21 Decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado[5])

$$M_{Rd} = N_c z + M_{pr}$$

Expressão 7 Determinação do momento resistente da secção com rotura por corte longitudinal

Com:

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

Expressão 8 Determinação da componente de flexão do diagrama de flexão plástica

$$z = h - \frac{z_{pl,c}}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{N_c}{N_{pa}}$$

Expressão 9 Braço do binário de forças tração no aço e compressão no betão

Em que:

N_c é a força de compressão no betão

M_{pa} é momento fletor resistente plástico da chapa perfilada

N_{pa} é a resistência à tracção da chapa perfilada

h é a espessura da laje mista

$z_{pl,c}$ é a posição do eixo neutro plástico do betão

e_p é o eixo neutro plástico da área efectiva da chapa perfilada

e é o eixo neutro elástico da área efectiva da chapa perfilada

A aplicação deste método revela que para soluções com grau de conexão, η , inferior a 0,4 a tensão última de corte, τ_u , determinada pelo método, é superior à que se verifica nos corpos de prova. Neste sentido foi proposta uma revisão do método que tem como objetivo minorar o momento fletor resistente da secção, para rotura em corte longitudinal, introduzindo dois novos coeficientes de minoração, η_1 e η_2 . O resultado foi uma nova decomposição para os diagramas de flexão composta da secção [10] (Figura 22).

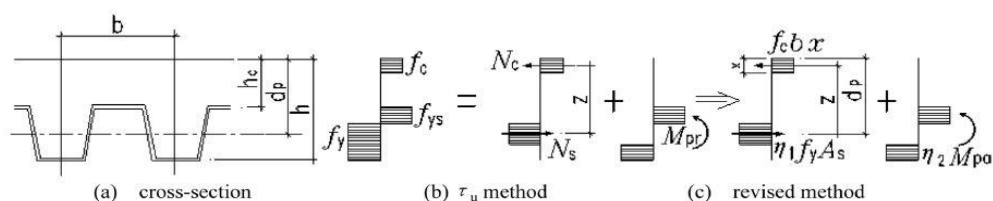


Figura 22 Nova decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado [10])

$$M_{Rd} = \eta_1 f_y A_s z / \gamma_{ap} + \eta_2 M_{pa}$$

Expressão 10 Determinação do momento resistente da secção com rotura por corte longitudinal - método revisto

$$z = d_p - \frac{x}{2} \quad x = \frac{\eta_1 f_y A_s / \gamma_{ap}}{0,85 b f_{ck} / \gamma_c}$$

Expressão 11 Determinação do braço do binário compressão-tração na secção

Em que:

η_1 e η_2 são constantes

M_{pa} é momento fletor resistente plástico da chapa perfilada

f_y é a tensão de cedência do aço

f_{ck} é a tensão de tensão característica do betão à compressão em provetes cilíndricos

A_s é a área de aço da secção

z é o braço entre a força de compressão no betão, N_c , e a força de tração no aço, N_s

d_p é a altura útil da secção

b é a largura de um módulo da chapa perfilada

γ_{ap} e γ_c são coeficientes de segurança (1,1 e 1,5 respetivamente) [2][1]

Os coeficientes η_1 e η_2 dependem do tipo de ligação da chapa perfilada às vigas (com ou sem conectores), do vão de corte, L_s , e da altura útil da secção, d_p , e são apresentados na Figura 23.

Specimens	η_1	η_2		
		$L_s / d_p = 0$	$0 < L_s / d_p < 15$	$L_s / d_p = 15$
No end anchorage	0.30	0	$0.0433L_s/d$	0.65
With end anchorage	0.65		0.40	

Figura 23 Coeficientes de redução η_1 e η_2 propostos (adaptado [10])

Após a determinação do momento fletor resistente para a rotura por corte longitudinal, é comparado com momento fletor atuante; sendo o segundo sempre inferior ao primeiro a segurança é garantida.

Comparando o método m-k com o método conexão parcial, o primeiro é mais conservativo, na medida em que a carga resistente resulta da regressão linear reduzida de 10% e é afetada com o coeficiente de segurança, $\gamma_{vs} = 1,25$, enquanto que o método da conexão parcial se baseia na resistência determinada nos ensaios. Deste modo, a carga de dimensionamento determinada pelo segundo método traduz uma solução mais eficiente [12].

2.2.3 - Ensaio de escorregamento

Este tipo de ensaios foi desenvolvido na Austrália e consiste em estudar o comportamento de provete de lajes mistas, que é de pequenas dimensões, de largura igual à dimensão do módulo da chapa perfilada e 300mm de comprimento.

O processo começa com a amostra da chapa perfilada, sendo esta soldada pontualmente a uma base fixa. Lubrifica-se a superfície da chapa, para evitar fenómenos de aderência e atrito, avaliando apenas o comportamento das deformações impostas à chapa perfilada; posteriormente betona-se o provete e ensaia-se, Figura 24.

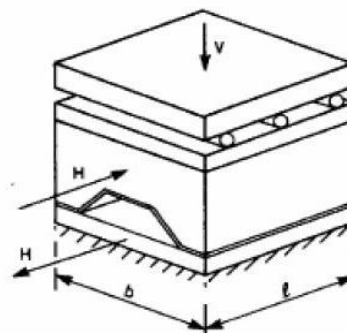


Figura 24 Ensaio de escorregamento (adaptado [25])

Inicialmente, aplica-se a carga vertical, V , e mantém-se constante enquanto a carga horizontal, H , vai aumentando gradualmente até se verificar escorregamento (ponto B, Figura 25a). Posteriormente, a carga vertical, V , vai diminuindo e o escorregamento vai aumentando, até se verificar separação entre os materiais (ponto C, Figura 25a). Por fim a carga vertical, V , volta a aumentar e inicia-se um novo ciclo (ponto D, Figura 25a).

Observando o gráfico de força horizontal, H , em função da força vertical, V , (Figura 24b) é possível determinar o coeficiente de atrito, μ , traduzido pelo declive das retas do referido gráfico.

A tensão última de corte, τ_u , é determinada pela Expressão 12.

$$H = \tau_u bl + \mu V$$

Expressão 12 Cálculo da tensão última de corte

Em que:

H é força horizontal

V é a força vertical

b é a largura do módulo da chapa perfilada

l é o comprimento do provete

μ é o coeficiente de atrito

A correspondência entre os resultados obtidos no ensaio de escorregamento e o comportamento da lajes mista real é obtida quando os valores de μ e τ_u são correspondentes a escorregamentos no provete compreendidos entre 2mm e 3mm.

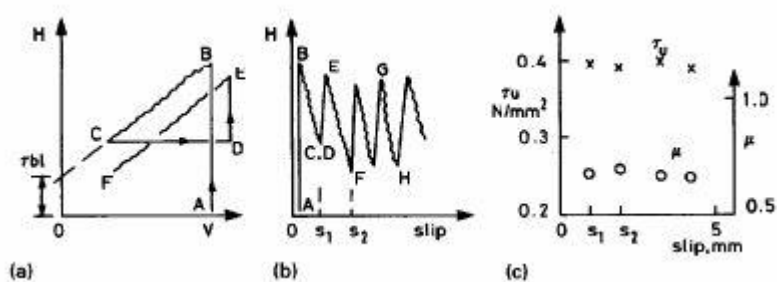


Figura 25 Resultados do ensaio de escorregamento (adaptado [25])

2.2.4 - Ensaio de arranque

O método baseado em ensaios de arranque foi desenvolvido com o objetivo de dar resposta à necessidade de incluir elementos como armadura de flexão e conectores, em lajes mistas, melhorando a resistência da secção[14]. Dada a

evolução tecnológica, verificada à data (1993), tornara-se possível desenvolver métodos analíticos mais complexos e precisos do que os propostos inicialmente (1967) por Porter e Ekberg[3].

Nesse processo, questionava-se ainda porque é que os resultados do método m-k podiam ser representados por uma regressão linear, como havia sido proposto [3].

A investigação concretizada em Lausanne [14] pioneiramente desenvolveu um modelo numérico que permitiu estudar o comportamento não linear da laje e a influência da conexão na resistência global da laje, tendo sido realizados ensaios de arranque (pull-out) para descrever o comportamento face ao escorregamento (bossas da chapa perfilada) e ensaios tipo push-off para caracterizar a resistência adicionada pelos conectores. O comportamento dos materiais foi depois simplificado, de forma a garantir que os resultados obtidos eram conservativos e se baseavam em modelos dúcteis de transmissão de esforços. Ignorou-se então, a capacidade resistente à tração do betão, a aderência química entre aço e betão, a contribuição da chapa perfilada para resistir a esforços de flexão negativos e a resistência do perfil foi estimada em ensaios de flexão, admitindo redução de resistência devida às bossas do perfil.

Com o objetivo de investigar o comportamento e a capacidade resistente da conexão entre a chapa perfilada e o betão ao longo da interface, recorreu-se a ensaios de arranque (Pull-out), sendo esta conexão assegurada pelas bossas) ou pela própria geometria do módulo. A geometria do perfil condiciona ainda o comportamento da secção ao corte longitudinal, dado que o perfil reentrante não permite separação vertical entre os materiais, contrariamente ao perfil trapezoidal [14][15].

Os corpos de prova deverão ter um comprimento que permita conter um número significativo de deformações (bossas ou entalhes) da chapa perfilada, não devendo no entanto ser exagerado de modo a que a força a aplicar seja demasiado elevada, o que levará à plastificação da secção. Foi sugerida a utilização de provetes com 300mm (+100mm não betonados de ligação entre chapas perfiladas) de comprimento aparafusados costas com costas e betonados com uma camada de 100 mm de espessura em ambas as faces (Figura 26). Antes da betonagem, o perfil

deve ser tracionado para eliminar instabilidades locais, pois a chapa perfilada é utilizada como armadura de tração em lajes mistas [14].

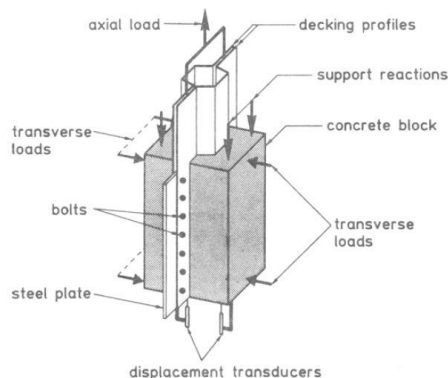


Figura 26 - Corpo de prova para ensaios de arrancamento (adaptado [14])

Chegando à fase de ensaio, são aplicadas forças transversais para simular o peso próprio da laje, sendo estas constantes ao longo do ensaio, e força axial progressivamente crescente no conjunto de chapas perfiladas, apoiando os “blocos” de betão. Periodicamente, registam-se a força axial e o correspondente escorregamento entre o perfil e os blocos de betão. O ensaio dá-se por concluído quando a chapa perfilada se separa dos blocos de betão.

O ensaio permite desenhar gráficos de resistência ao corte, τ_u , versus escorregamento, que caracterizam o comportamento da conexão como frágil ou dúctil.

No caso de conexões com comportamento frágil, a resistência máxima deve-se à aderência química entre a chapa perfilada e o betão, situação típica de perfis lisos (sem bossas). Contrariamente, conexões dúcteis apresentam a resistência máxima após se verificar escorregamento entre os materiais, normalmente compreendidos entre 1 e 4 mm para a força aplicada máxima [14].

O pico de resistência observado na Figura 27 para um escorregamento de 0mm deve-se à aderência entre os materiais, sendo esta componente da resistência normalmente desprezada por ter comportamento frágil na rotura.

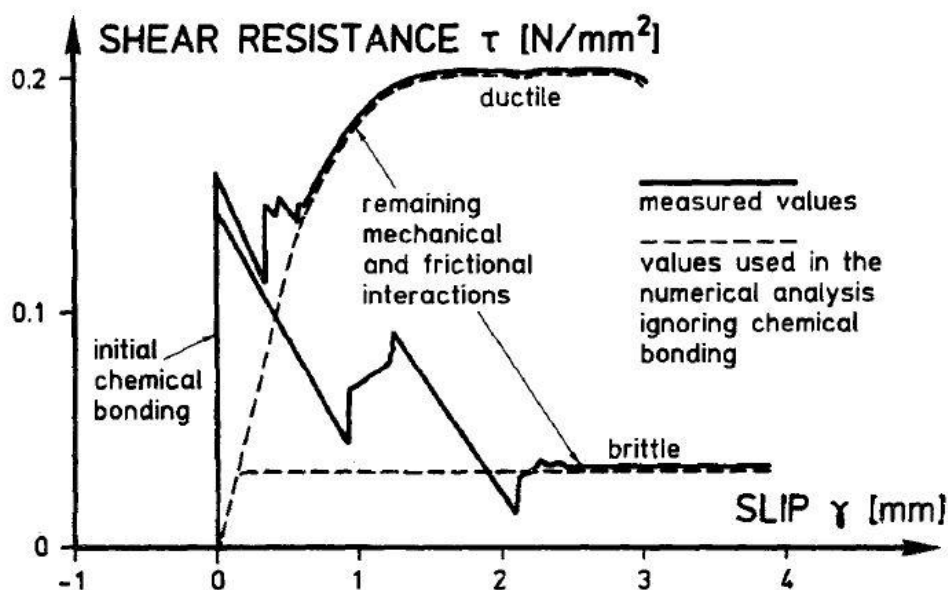


Figura 27 - Resultado típico de ensaios de arrancamento (adaptado [14])

Comparando os resultados obtidos pelo método “m-k” [3] com os ensaios de escorregamento [14], concluiu-se que o modelo de elementos finitos baseado no comportamento descrito pelos ensaios de escorregamentos, fornece resultados razoáveis e conservativos, analogamente ao método “m-k”.

2.2.5 - Método das forças de equilíbrio

O método das forças de equilíbrio foi proposto por Li An em 1993 e permite calcular a relação entre a força de corte longitudinal e o escorregamento [18].

Como hipóteses, considera-se o escorregamento constante ao longo do vão de corte, L_s , bem como as tensões devidas ao esforço de corte longitudinal. O eixo neutro localiza-se sempre acima o banzo superior do perfil e, quando o betão fissura, afasta-se deste. O escorregamento que não leva à rotura é desprezável e os raios de curvatura do betão e do aço são iguais. Devido ao escorregamento, há sempre dois eixos neutros e o perfil é solicitado à flexão segundo o seu eixo neutro; secções paralelas mantêm-se paralelas em flexão e normais ao eixo neutro, por fim a resistência à tração do betão é desprezada.

O método baseia-se no ensaio de flexão uma nervura de laje, segundo as mesmas condições de carga do método “m-k”, (Figura 28).

Durante o ensaio, efetuaram-se medições dos deslocamentos verticais nos pontos de carga, a carga e o escorregamento na extremidade da secção, (Figura 29a,b).

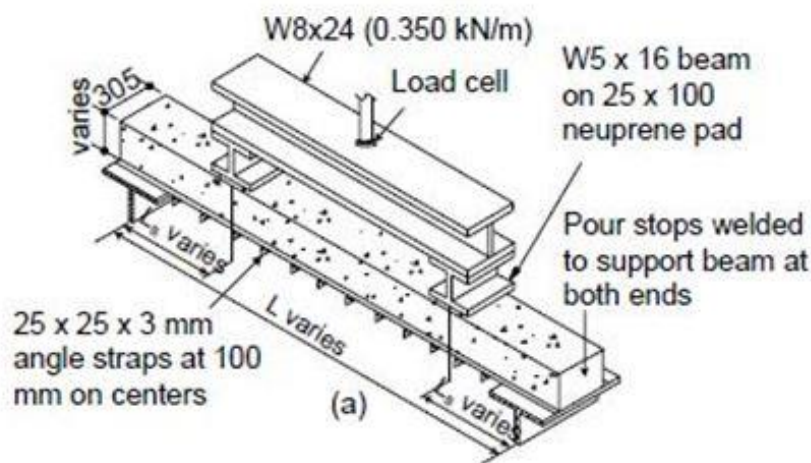


Figura 28 Ensaio de flexão em uma nervura de laje mista (adaptado [19])

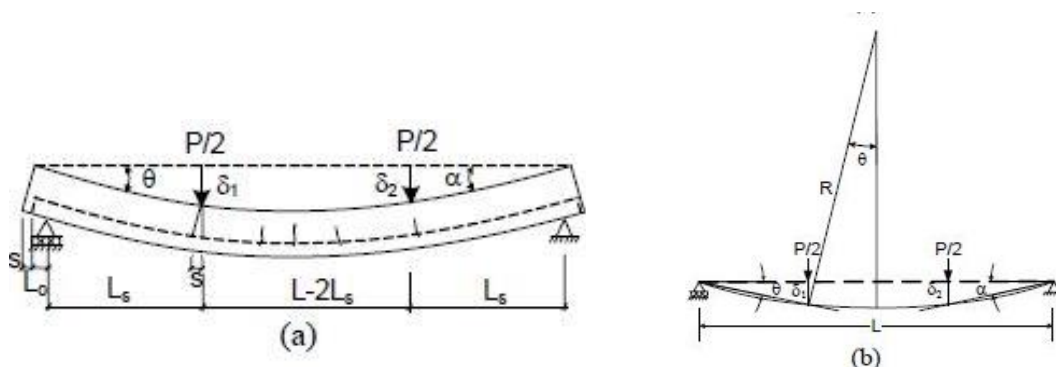


Figura 29 Fissuração da laje ensaiada (a); Deslocamentos e curvatura da laje ensaiada (b) (adaptado [18])

Nos ensaios de flexão, verificou-se que as almas do perfil encurvaram devido ao excesso de força concentrada nas bossas do perfil quando o betão escorregou devido à flexão da laje, sendo este o mecanismo que levou à rotura da laje pela interface [19].

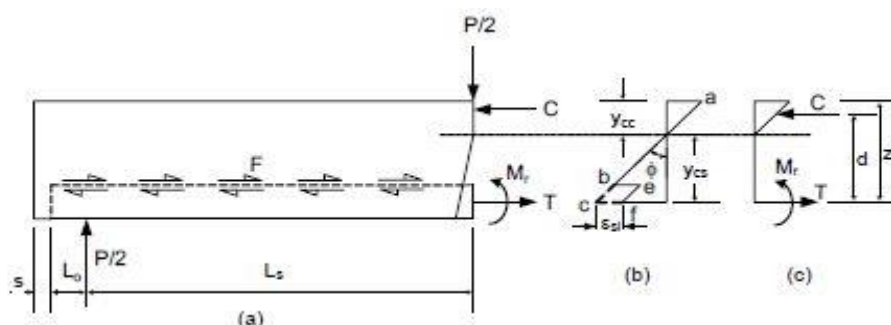


Figura 30 Diagrama de corpo livre da laje (a); Diagrama de extensões (b); Diagrama de tensões e esforços internos (c) (adaptado [18])

Na Figura 30^a, apresenta-se o diagrama de corpo livre que tem por base o método e os digramas tipo de extensões (Figura 30b) e tensões (Figura 30c) da laje mista com interação parcial.

Para lajes mistas com conexão parcial, em qualquer instante, i , a força de corte longitudinal, F_i , tem a mesma intensidade que a força axial do perfil, T_i , e pode ser determinada pela Expressão 13 [18][19], tendo em conta o binário de forças compressão- tração.

$$F_i = T_i = \frac{\left(\frac{P_i}{2} L_s - M_{ri}\right)}{z_i}$$

Expressão 13 Calculo da força de corte longitudinal (Método das forças de equilíbrio)

Em que:

P_i é a carga aplicada no instante i

L_s é o vão de corte

z_i é o braço do binário de forças no instante i

M_{ri} é o momento resistente do perfil solicitado no instante i

O momento resistente do perfil solicitado no instante i é determinado baseando-se na relação entre o esforço de flexão e a curvatura do perfil, $\frac{M}{E_s I_s} = \frac{1}{R}$, pela Expressão 14.

$$M_{ri} = \frac{\delta_{1i} + \delta_{2i}}{L_s(L - 2L_s)} E_s I_s$$

Expressão 14 Calculo do momento fletor resistente do solicitado no instante i

Em que:

δ_{1i} e δ_{2i} são os deslocamentos verticais da nervura no instante i

L_s é o vão de corte

L é o vão livre da nervura ensaiada

E_s é o modulo de young do perfil

I_s é a inércia do perfil

Quanto ao braço do binário de forças compressão tração, é determinado pela Expressão 15 e depende da posição do eixo neutro da secção. A posição inicial, y_{cc} , depende só da geometria da secção mista, pois o betão não está fissurado, e é determinado pela Expressão 16.

$$z_i = d - \frac{1}{3}y_{cci}$$

Expressão 15 Braço do binário de forças compressão - tração (Método das forças de equilíbrio)

$$y_{cc} = d \left\{ [2\rho n + (\rho n)^2]^{\frac{1}{2}} - \rho n \right\}$$

Expressão 16 Posição do eixo neutro da secção mista (Método das forças de equilíbrio)

Em que:

d é a espessura total da laje

y_{cci} é a posição do eixo neutro da secção mista no instante i

ρ é a taxa de armadura, $\rho = A_s/(bd)$, A_s é a área de aço por nervura, b é a largura da nervura

n é o coeficiente de homogeneização, $n = E_s/E_c$

E_s e E_c são os módulos de young do aço e do betão, respectivamente

Ao solicitar a secção, o betão fissa e escorrega ao longo da interface; consequentemente, a posição do eixo neutro desloca-se ascensionalmente na vertical. Para cada instante, i , a posição do eixo é determinada com a Expressão 17.

$$y_{cci} = d - y_{csi} \quad \text{com} \quad 0 \leq y_{cci} \leq h_c$$

Expressão 17 Posição do eixo neutro da secção mista com o betão fissurado (Método das forças de equilíbrio)

Em que:

y_{csi} é o comprimento da fissura no betão no instante i , $y_{csi} = \frac{s_i L_s}{(\delta_{1i} + \delta_{2i})}$

h_c é a espessura da camada de betão acima do banzo superior do perfil

s_i é o escorregamento no topo da nervura no instante i

O método descrito foi testado e validado para lajes mistas com perfil trapezoidal, mas, dado que o método se baseia no equilíbrio de forças ao longo da chapa, é aplicável a todos os tipos de perfis [18].

2.2.6 - Método de elementos finitos

Os modelos de elementos finitos utilizam a informação recolhida através do método experimental para calibrar o comportamento não linear da interface aço-betão.

A vantagem deste método reside na possibilidade de estudar alterações nas especificações da interface ou dos materiais, sem recorrer a ensaios laboratoriais, economizando tempo e dinheiro. Vários investigadores têm recorrido a estes modelos virtuais, pretendendo não só propor e estudar novas soluções mais eficientes, mas também estudar a interface aço-betão, a qual é a característica limitadora da resistência do sistema construtivo. Cada autor desenvolveu o seu modelo e cada um é único quanto aos critérios de rotura utilizados e quanto à modelação dos materiais e da interface.

Em 1993, Daniels, J. B. [14] propõe um modelo de elementos finitos no qual o comportamento da secção era baseado no raio de curvatura da secção, ϕ , e na força axial, N , e é igual à soma das forças de corte transferidas entre os materiais em direções opostas. O comportamento e a carga de rotura da laje foram estimados com a análise não linear em interação parcial. Contudo, não se consideraram as tensões residuais da chapa perfilada, o efeito da retração e da fluência do betão ao longo do tempo, a flexão da laje segundo dois eixos. Os materiais foram definidos individualmente, a chapa perfilada, o betão, rede electrosoldada e conectores, considerando o comportamento linear e não linear de cada baseando nos diagramas tensão-extensão, $\sigma - \varepsilon$, determinados experimentalmente. Quanto à conexão, estudaram-se bossas e conectores, partindo do pressuposto que estes estão distribuídos uniformemente ao longo da laje, e o comportamento é descrito com os dados recolhidos de ensaios de arrancamento (caracterizam a chapa perfilada) e escorregamento (caracterizam os conectores)(Figura 31).

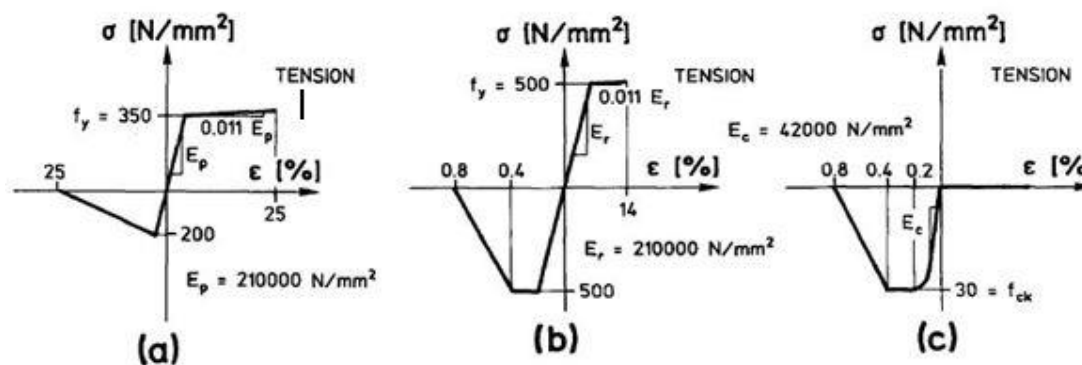


Figura 31 Comportamento $\sigma - \epsilon$ dos materiais: a) chapa perfilada; b) rede electrosoldada; c) betão (adaptado [14])

Crisinel, M.[11][17] melhorou o modelo de forma a estudar a influência de cada característica do perfil na resistência global da laje e ainda as condições da superfície, sendo agora estudada apenas a ligação mecânica da interface, promovida pelas bossas.

Em 2011, Chen, S. [7], desenvolveu um modelo baseado no conceito de fricção de Coulomb, tendo considerado a interface deformável e a não linearidade material. Utilizou-se critério de rotura de William-Warnke² para o betão, contemplando a capacidade de o betão fissurar em tração e de esmagar em compressão, e o critério de cedência de Von Mises para a chapa perfilada³. O volume de betão foi modelado como um elemento sólido e elementos finitos cúbicos de 8 nós e a chapa perfilada foi modelada tipo casca com elementos finitos quadrados de 4 nós. A chapa perfilada foi modelada sem bossas, e, posteriormente, definiram-se as características da conexão de acordo com os resultados obtidos a partir dos ensaios de arrancamento, nomeadamente o coeficiente de atrito, μ , e o sentido possível de escorregamento. Para controlar o efeito de separação vertical, utilizam-se “molas fracas” que garantem que as superfícies se mantêm em contacto (Figura 32).

² Critério que permite prever a rotura do betão baseado nos invariantes do tensor das tensões de Cauchy (I_1 , J_2 e J_3), requiere a determinação prévia da tensão resistente de compressão uniaxial, biaxial e da tensão resistente de tração uniaxial [23].

³ Critério que prevê a rotura do aço baseado no tensor de tensões de Cauchy [21].

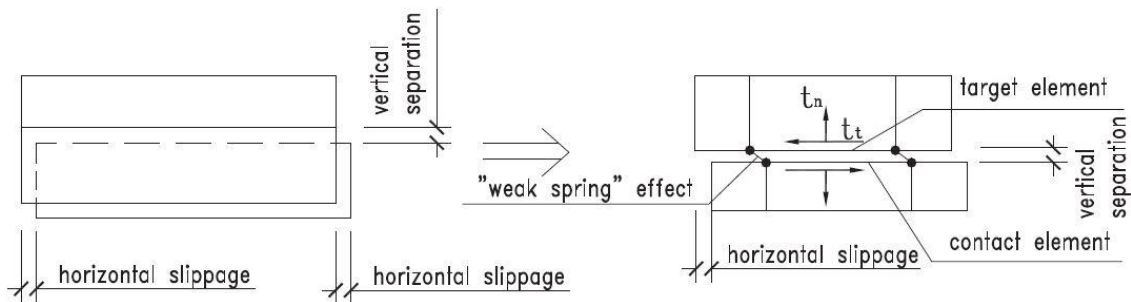


Figura 32 Modelo analítico da interface aço-betão (adaptado [6])

2.3 - Ações

As ações a considerar para verificar a segurança de chapas perfiladas utilizadas como cofragem são:

- Peso próprio da chapa
- Peso próprio do betão fresco
- Sobrecarga de construção
- Sobrecarga de armazenamento de material
- Efeito de “poça”

A quantificação de ações, analogamente a qualquer outra estrutura, deve respeitar a norma[1], onde é definido que o peso volúmico do aço está compreendido entre 77kN/m³ e 78,5kN/m³. Quanto ao betão, o peso volúmico do betão é 24 kN/m³, devendo a este somar-se 1kN/m³, prevendo a integração de armaduras e mais 1 kN/m³, contabilizando o peso do betão fresco.

Relativamente às sobrecargas, deve-se prever uma sobrecarga de 1 kN/m², salvaguardando o peso de operários e de pequeno equipamento. Quanto aos impulsos provocados pela betonagem, deve considerar-se uma sobrecarga uniformemente distribuída de intensidade igual a 10% do peso próprio da laje mista, mas maior que 0,75 kN/m² e menor que 1,5 1 kN/m². Caso o betão seja bombado, deverá considerar-se o limite superior.

Como a chapa perfilada tem função de cofragem, é ainda prevista uma carga concentrada de 1 kN que pretende traduzir um operário, sobre uma área de 0,30x0,30m.

Relativamente ao efeito de “poça”, a norma[2][1] prevê que a deformação da chapa sujeita à ação do seu peso próprio e do betão fresco deve ser contabilizada, caso a flecha a meio vão, seja superior a 1/10 da espessura da laje,

h, e, assim, deve colocar-se uma camada adicional de betão em toda a laje de espessura equivalente a 70% da flecha verificada, sendo que esta não poderá ser considerada para a verificação da capacidade resistente da laje.

Para diminuir a influência das sobrecargas na determinação da espessura da chapa perfilada, durante a betonagem, é recomendável que se restrinja a equipa a 4 operários, que se coloque o betão o mais próximo possível da área a betonar, evitando acumulação e montes de betão fresco, é preferível utilizar betão bombeado e a vibração deverá ser moderada.

Em fase de utilização, devem ser consideradas todas as sobrecargas combinadas com o peso próprio da laje.

Capítulo 3 - Metodologia

3.1 - Objetivo da metodologia proposta

Em conformidade com o subcapítulo 2.1, identifica-se a dificuldade em caracterizar o caminho de carga, desde a solicitação até ao apoio, em lajes mistas aço-betão, pretendendo-se assim, construir um modelo de escoras e tirantes que permita avaliar o caminho de carga neste tipo de estruturas.

Paralelamente, procura-se satisfazer a necessidade de compreensão do comportamento conexão aço-betão, devida à influência da geometria e da forma de conexão na capacidade resistente global da laje.

Recorrendo ao método de elementos finitos, pretende-se descrever o estado de tensão em um módulo de laje, permitindo identificar as tensões e os vetores principais. Avaliando a informação obtida destes modelos, propõem-se caminhos de carga.

Concluído o estudo da interface, idealizar-se-á uma solução que dê resposta à solicitação de forma mais eficiente que as disponíveis.

Justificada a pertinência da solução proposta face à solução de referência, constroem-se corpos de prova para testar a solução.

3.2 - Princípios gerais da metodologia

Justificando cientificamente a metodologia a aplicar no estudo da interface aço-betão em lajes mistas com chapa perfilada, com recurso a modelos de escoras e tirantes e modelos de elementos finitos, apresentam-se os fundamentos gerais e essenciais dos métodos a aplicar.

3.2.1 - Método de elementos finitos

No caso em estudo recorre-se a este método para quantificar tensões e deformações em modelos virtuais que traduzem o problema real [29].

O método consiste em fragmentar virtualmente um elemento contínuo em pequenas partes, que se unem por pontos nodais. Esta simplificação baseia-se no pressuposto de que o problema em estudo pode ser dividido em pequenas partes e quando todas elas são solucionadas, a soma das soluções é o resultado do problema inicial [28].

Na análise de estruturas volumétricas, a estrutura é ficticiamente dividida em cubos de pequena dimensão e com as propriedades materiais do elemento estrutural inicial. Correntemente, estes fragmentos cúbicos são denominados de “tijolos” (Figura 33). Como incógnitas a determinar pelo método afirmam-se os deslocamentos nodais em cada um dos oito vértices do elemento finito [28].

Conhecidos os deslocamentos nodais e recorrendo à lei constitutiva do material, é determinado o estado de tensão em cada nó e, posteriormente, é interpolado o valor da tensão em cada faceta do elemento finito que permite a descrição do problema inicial em mapas de tensões [28][29].

Este método tem sido utilizado na engenharia por facilitar a caracterização do estado de tensão de corpos de prova sem recorrer a ensaios laboratoriais e, associado às capacidades computacionais atuais, permite estudar o nível de tensão instalado em modelos tridimensionais garantindo o compromisso com o comportamento real verificado em ensaios [28].

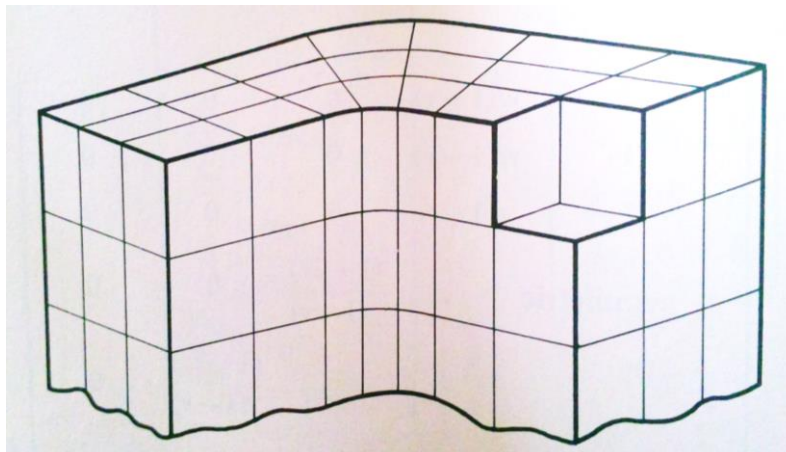


Figura 33 Representação da fragmentação de um elemento contínuo (adaptado [28])

3.2.2 - Modelo de escoras e tirantes

O recurso a treliças virtuais para estudar elementos de betão armado fissurado, proposto por Mörsch⁴ (1912), é um método prático e racional que permite dimensionar armaduras passivas para elementos solicitados à flexão, corte e torção. O dimensionamento de elementos estruturais com base no método

⁴ Método de estudo e dimensionamento de elementos estruturais em betão armado, no qual o sistema construtivo é tratado virtualmente com uma viga treliçada onde as escoras representam compressões no betão e os tirantes evidenciam a localização e a quantidade de aço estrutural necessário [26].

da treliça de Mörsch é viável apenas em partes da estrutura. Em zonas onde se verifica descontinuidades estáticas ou geométricas, cargas ou variações de secção a teoria não é aplicável.

Os modelos de escoras e tirantes consiste na generalização do método de Mörsch, observando o caminho que a força percorre desde o ponto de carga até aos apoios, para qualquer estrutura e qualquer solicitação, pois o equilíbrio em qualquer estrutura é garantido por forças de tração e compressão que se autoequilibram, permitindo encaminhar as solicitações para os apoios. Na prática, estas forças distribuem-se em campos de tensão tridimensionais e são equilibrados por tirantes. Analiticamente, os modelos de escoras e tirantes condensam os campos de tensão em elementos fictícios solicitados a esforço axial de compressão ou tração (escoras e tirantes). Extrapolando para o betão armado, recorre-se a betão para as escoras de aço para os tirantes [26].

As regiões onde a hipótese da distribuição uniforme de tensões de Bernoulli⁵ é aplicável o método da treliça de Mörsch e os esforços de tração-compressão são facilmente determinados com base nas propriedades da secção são denominadas por regiões “B” (em que “B” evidência a hipótese de Bernoulli). As regiões em que a distribuição de tensões ao longo da secção é não linear, como em esquinas, cargas pontuais, variações de secção... são denominadas de regiões “D” (em que “D” evidencia zonas de descontinuidade estrutural). Historicamente as zonas “D” eram tratadas inadequadamente com “experiencia de detalhe construtivo” nas quais se ancorava aço estrutural. Contudo, estas zonas requerem mais atenção, uma vez que a ausência de dimensionamento conduziu a comportamentos estruturais ineficientes e até a roturas precoces[26].

Para identificar as zonas “B” e “D” num elemento de betão armado, a estrutura real é substituída por uma estrutura fictícia que obedece à hipótese de Bernoulli. Escolhe-se um estado de tensão que se autoequilibre, mas que respeite as condições de apoio da estrutura real e aplica-se o princípio de Saint-Venant⁶,

⁵ Numa peça sujeita a esforço normal e momento fletor constantes, as secções planas mantêm-se planas e perpendiculares ao eixo durante a deformação [27].

⁶ Num corpo sujeito à ação de um sistema de forças atuando numa zona limitada da sua superfície, as tensões e deformações que esse sistema de forças provoca a uma distância grande da superfície de aplicação não dependem da maneira particular como as forças estão aplicadas, mas apenas da sua resultante [27].

desprezando o efeito das condições de apoio para uma secção que diste mais que a largura da secção do apoio. Esta distância define a zona “D”.

As zonas “D” requerem a idealização de um modelo de escoras e tirantes para cada caso. Este processo é simplificado se forem conhecidas as tensões do elemento em comportamento elástico e as direções principais das tensões. Assim, as escoras seguem a orientação das forças de compressão ao longo da secção enquanto que os tirantes se orientam ao longo dos campos de tensão tracionados [27].

A estrutura fictícia pode também ser baseada no caminho de carga, determinando-se com este objetivo, as reações de apoio e considera-se uma distribuição de tensão linear na transição de zona “D” para “B” e de “B para D”. Os caminhos de carga iniciam-se e encaminham-se para os centros de gravidade dos diagramas de tensões dos pontos de carga e de apoio, traduzindo a direção (convergente ou divergente para a secção) consoante o sinal do diagrama. Após traçar os caminhos de carga com curvas suaves e substituí-las por polígonos, será necessário adicionar novos tirantes para equilibrar os nós transversalmente, devendo ser, todavia, colocados perspetivando a necessidade de introduzir armadura de tração para estes tirantes. Assim, é preferencial conceber traçados em que os tirantes se orientam verticalmente ou horizontalmente [26][27].

O traçado de modelos de escoras e tirantes torna-se mais acessível combinando o método de elementos finitos ao processo, obtendo deste método diagramas de tensões em várias secções do elemento de betão armado bem como o caminho de carga, que facilita a escolha do modelo mais adequado [26] .

No dimensionamento com recurso a modelos de escoras e tirantes, é essencial verificar a resistência das escoras e tirantes de betão e dos tirantes de aço, bem como o equilíbrio de todos os nós do modelo.

3.2.3 - Método experimental

O método experimental a aplicar no estudo consiste em ensaiar corpos de prova sujeitos a esforço de corte longitudinal na interface aço-betão, visando avaliar a capacidade resistente das chapas perfiladas, como descrito anteriormente no subcapítulo 2.2.4 - Ensaios de arranque.

Os provetes a construir são diferentes dos sugeridos [14] para este tipo de ensaios, pois pretende-se comprovar que os modelos de elementos finitos e de escoras e tirantes traduzem o comportamento real da estrutura, acompanhando o raciocínio desenvolvido ao longo de toda a investigação. Assim, contrariamente ao descrito, no subcapítulo 2.2.4 - Ensaios de arranque, o corpo de prova será construído com uma fração de chapa perfilada correspondente a um módulo com uma onda inferior do painel (Figura 34).

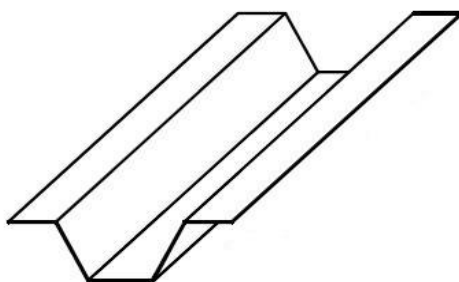


Figura 34 exemplo da fração de chapa perfilada a utilizar nos ensaios de arranque

Os provetes serão ensaiados em pares, sendo estes soldados, entre si, ao longo dos banzos inferiores e a perfis UPN120 ao longo do banzo superior (Figura 35), perfis nos quais será transmitida carga aos provetes, conduzindo a rotura pela interface aço betão e permitindo avaliar o comportamento da conexão.

Aquando do ensaio experimental, serão aplicados tirantes formados por varão roscado que serão pré-esforçados de forma a simular a carga transversal atuante sobre a laje (Figura 35).

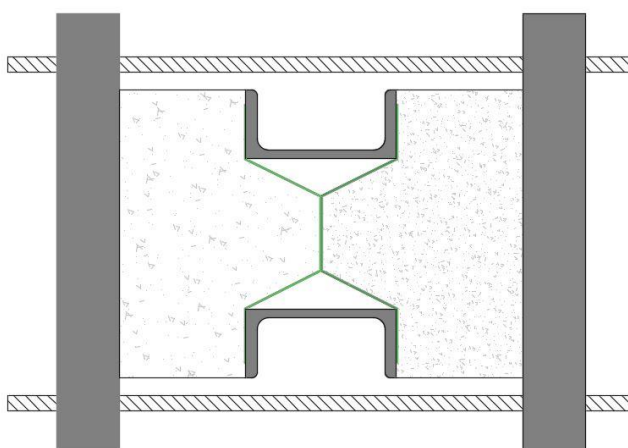


Figura 35 desenho esquemático dos corpos de prova (secção transversal)

Os ensaios laboratoriais dos provetes construídos serão realizados no laboratório de estruturas da Universidade da Beira Interior e serão realizados com

equipamentos e material auxiliar pertencente ao referido laboratório, que será apresentado no subcapítulo 4.7- Proposta de nova solução

3.3 - Procedimento geral da metodologia

A investigação desenvolve-se faseadamente e é regrada por objetivos simples e tangíveis, promovendo o interesse do estudo.

Na primeira fase, aplica-se a metodologia analítica descrita, procurando compreender e avaliar o caminho que uma carga distribuída aplicada na face superior da laje descreve até ao apoio, bem como o estado de tensão e a magnitude de esforço gerados no interior da laje colaborante. Posteriormente, determinam-se as tensões principais e os vetores principais associados ao estado de tensão descrito pelo FEM e esquematizam-se no enquadramento da secção transversal.

Baseado na análise tensorial das secções transversais, propõem-se caminhos de carga adequados às várias geometrias em estudo, negligenciando o efeito das zonas de apoio, por serem zonas descontínuas.

Posteriormente, o estudo foca-se na secção trapezoidal e propõe-se um modelo de escoras e tirantes que descreva o comportamento da laje ao longo de um módulo.

A investigação culminará na proposta de uma nova solução para a conexão aço betão que seja mais resistente e permita explorar eficientemente os materiais utilizados na solução construtiva.

Constroem-se depois corpos de prova que permitam comprovar a compatibilidade entre o modelo de escoras e tirantes e o comportamento real da secção, permitindo avaliar a eficiência da solução proposta comparativamente à solução existente que tem vindo a ser estudada.

Serão construídos dois grupos de provetes, sendo o primeiro grupo formado por uma chapa perfilada fornecida pelo fabricante, em que nas almas existem bossas com a disposição real do produto. O segundo grupo é construído com chapa perfilada com a geometria igual à da solução fornecida pelo fabricante, apesar de as almas serem munidas de bossas com a disposição proposta pela metodologia analítica. Sobre a chapa, será colocado betão com 10cm de espessura, de forma a traduzir uma solução de laje colaborante com 16cm de espessura total.

Posteriormente, os provetes são ensaiados até à rotura e os dados são recolhidos por equipamentos que permitem exportar os dados para um software informático de tratamento dados.

Capítulo 4 - Análise numérica

4.1 - Modelação de perfis

Nesta fase teve-se por base chapa perfilada H60[34] (Figura 36), pois prevê-se a realização de ensaios laboratoriais e o fabricante mostrou-se disponível a ceder amostras do material para a construção de corpos de prova. Baseado na chapa perfilada existente e com o objetivo de estudar também as secções reentrantes e retangulares, idealizaram-se secções com a mesma distância entre banzos e com o mesmo comprimento de módulo, alterando apenas a inclinação das almas.



Figura 36- Chapa perfilada H60

A secção retangular (Figura 37), foi adicionada ao estudo por se tratar de um solução não produzida por nenhum fabricante e pretende-se investigar o motivo pelo qual todos os fabricantes produzem chapas perfiladas trapezoidais ou reentrante.

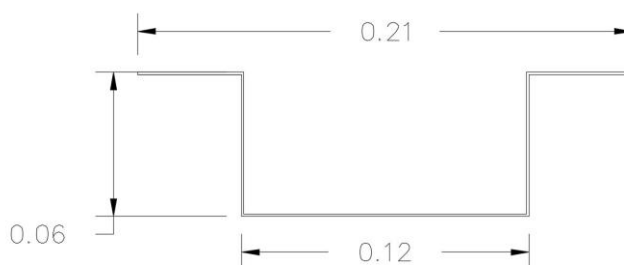


Figura 37- Secção retangular em estudo

A secção reentrante (Figura 38), foi analisada por ser a geometria alternativa à trapezoidal e pretende-se estudar as vantagens e desvantagens entre elas.



Figura 38- Secção reentrante em estudo

Para estudar estas soluções utilizou-se o software ROBOT [30]. Modelaram-se corpos tridimensionais para o aço e para o betão, e criaram-se malhas de elementos finitos tridimensionais associadas às volumetrias dos materiais.

Na modelação, caracterizou-se o material aço com tensão de cedência (f_{yk}) de 320 MPa, módulo de Young (E) de 210 GPa, módulo de cisalhamento (G) de 80,8 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0.3 e peso específico (γ) de 77 kN/m³. Quanto ao betão considerou-se classe C25/30 com tensão característica (f_{ck}) de 25MPa, módulo de Young (E) de 38 GPa, módulo de cisalhamento (G) de 16,3 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0.16 e peso específico (γ) de 24,50kN/m³.

Para modelar a geometria, construíram-se contornos para o betão e o aço, que foram posteriormente extrudidos ao longo de um vão com 2 metros e fracionados 200 vezes permitindo construir malhas de elementos finitos cúbicos com 1 cm de lado, aos quais se atribuíram-se as propriedades aos materiais.

Como esquema estrutural, considerou-se por base o perfil H60 com 0,205m de largura, equivalente a um módulo de chapa perfilada e vão de 2m simplesmente apoiada. Para simular o efeito de continuidade da laje, consideram-se apoios de superfície nas faces de betão e aço adjacentes aos módulos vizinhos, limitando assim as deformações transversais. Como solicitação, considerou-se uma carga distribuída de 20 kN/m² e desprezou-se o peso próprio de forma a que as tensões atuantes sejam devidas apenas à solicitação, eliminando assim o fator peso próprio do estudo, uma vez que este é variável consoante a geometria da chapa perfilada.

Para análise, criou-se uma malha de elementos finitos cúbicos tipo Coons com 1 cm de aresta, Figura 39. De forma a obter resultados coerentes, procurou-se assegurar que a malha de elementos finitos seria regular e sem elementos disformes que possam introduzir erros no cálculo das tensões atuantes.

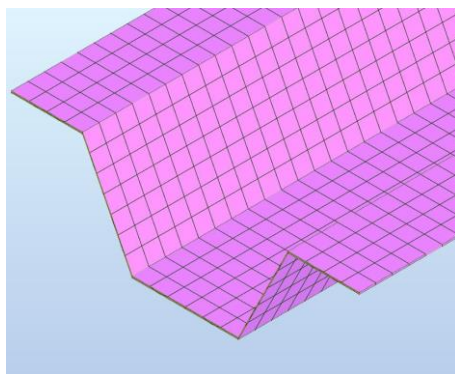


Figura 39 - Malha de EF de cálculo

4.2 - Análise de tensões

Na análise de tensões nos modelos criados, começou-se por avaliar a credibilidade do modelo, observando as tensões no aço e no betão. O comportamento misto da secção pressupõe que a chapa perfilada seja solicitada à tração e o betão apresentará compressões no topo da laje e trações na zona em contacto com a chapa perfilada. Caso os modelos não se comportassem como uma secção composta por dois materiais, ambos, aço e betão apresentariam tensões de compressão e tração, de acordo com o subcapítulo 2.1.2 - Forças na interface aço-betão.

4.2.1 - Secção Trapezoidal

Analisando a secção trapezoidal, verifica-se que tem comportamento adequado e compatível com os pressupostos da investigação. Apresenta trações em toda a chapa, Figura 40, e de magnitude 13,14 MPa. Verifica-se que os apoios introduzem alteração na distribuição de tensões tanto nas almas como no banzo inferior da chapa, fenómeno que não será alvo de análise no presente trabalho de investigação.

Observando as tensões segundo o eixo longitudinal da secção de betão, Figura 41, conclui-se que o comportamento está em conformidade com o de elementos solicitados à flexão. Verificam-se compressões de 1.80 MPa na face superior do betão e trações de 1.80 MPa na face em contacto com a chapa perfilada.

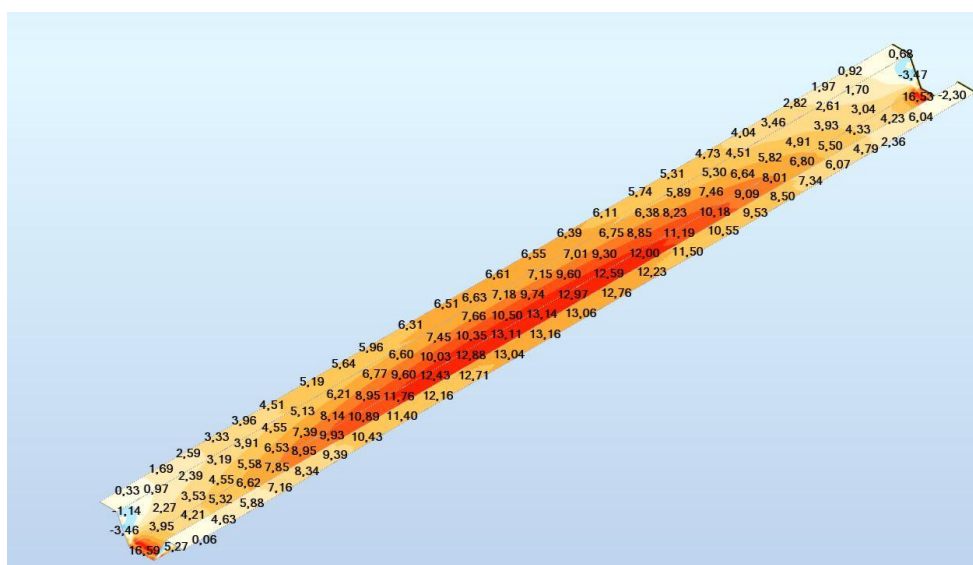


Figura 40 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal)

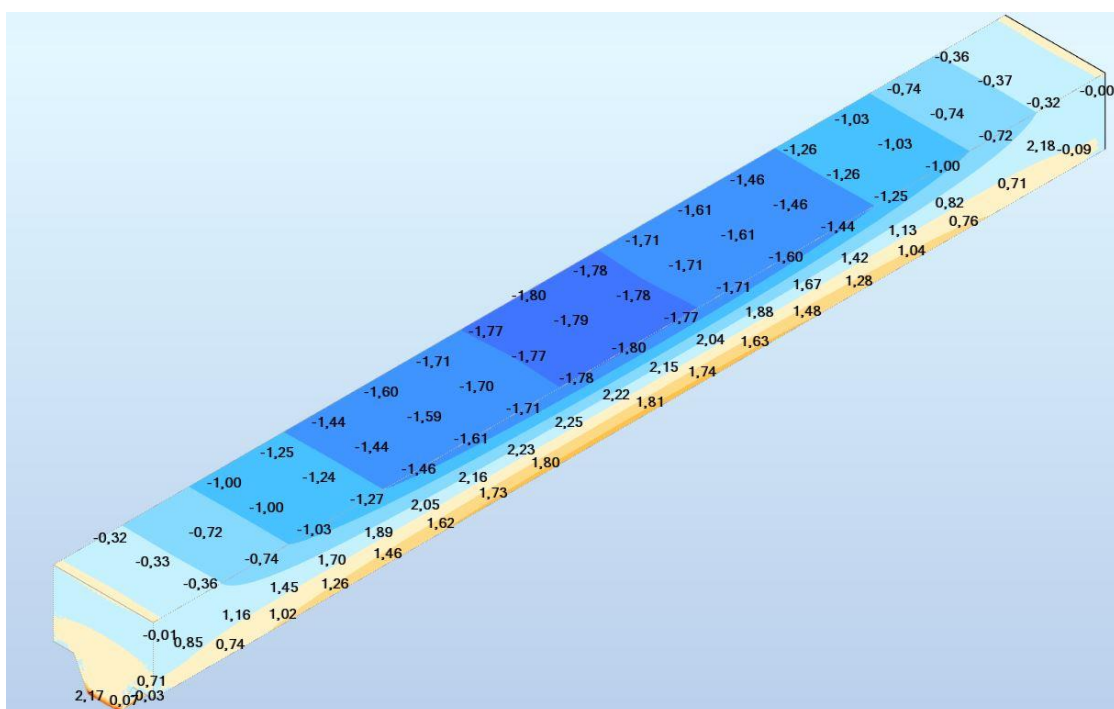


Figura 41 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Trapezoidal)

Analisando as tensões tangenciais na interface aço-betão observa-se a distribuição simétrica ao longo do vão e com eixo de simetria a meio vão, Figura 42. As tensões têm magnitude crescente ao longo do vão embora o valor máximo não se verifique no extremo do vão, devido ao efeito das condições de apoio, mas sim a $0,05 \times$ vão (m) dos apoios, sendo esta a zona preferencial de rotura por corte longitudinal. O fenómeno de rotura inicia-se pela fissuração do betão desde a face superior até à interface aço-betão, seguida de rotura da interligação mecânica entre o betão e as bossas da chapa perfilada, e conseqüentemente < fração de betão entre o a secção fissurada e o apoio escorrega sobre a chapa provocando o colapso total da laje.

Para o caso em estudo, laje simplesmente apoiada com 2m de vão livre, solicitada por uma carga distribuída de 20 kN/m^2 , a tensão de corte longitudinal, τ_{yx} , máxima verificada é $0,65 \text{ MPa}$, Figura 42.

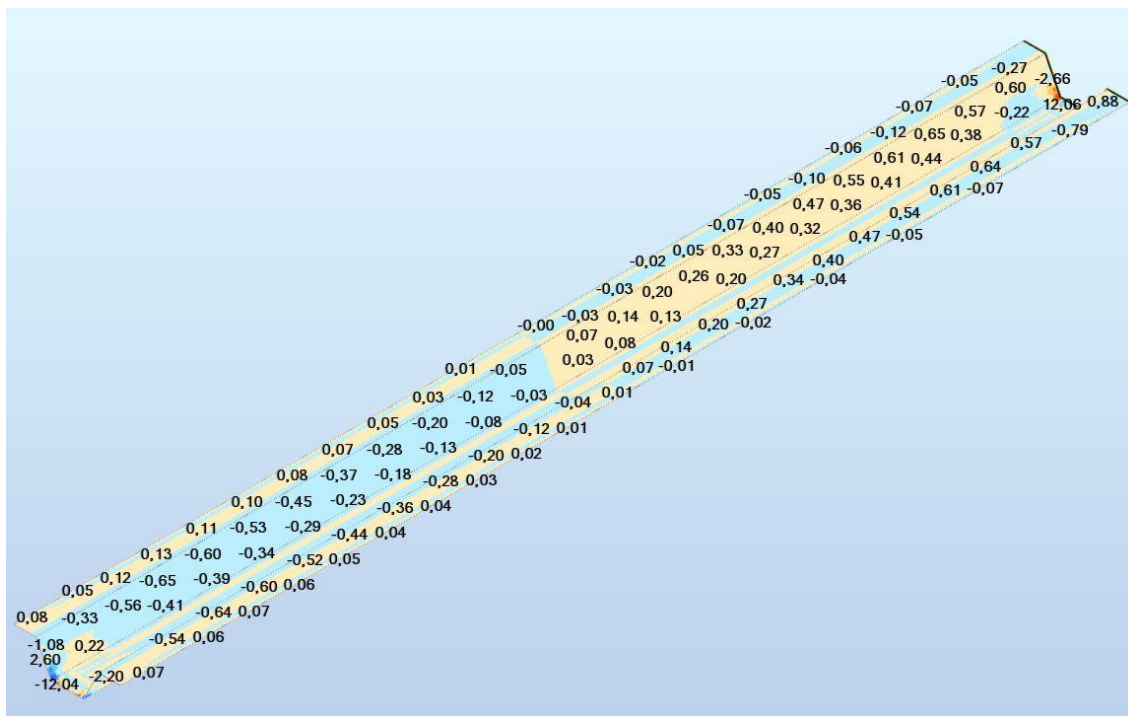


Figura 42 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Trapezoidal)

Atento nas tensões tangenciais com orientação perpendicular à chapa perfilada observam-se as forças resultantes do “efeito de cunha” descrito no subcapítulo 2.1 - Composição e comportamento

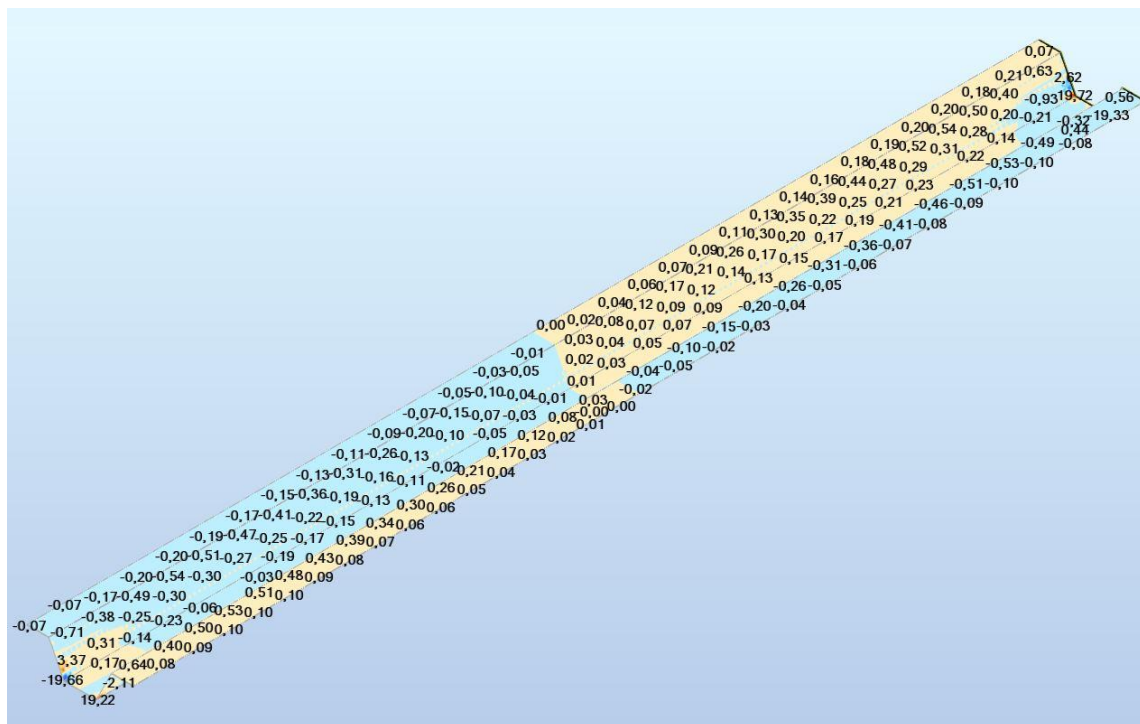


Figura 43 - Tensões transversais, τ_{xy} , na interface aço- betão (Secção Trapezoidal)

Ao longo de todo o vão verificam-se as forças de separação dos materiais conforme descrito no subcapítulo 2.1.2 - Forças na interface aço-betão. Em flexão, os materiais com deformabilidade diferente, tendem a separar-se. A existência deste fenómeno é demonstrada pelo estudo, apresentando as tensões calculadas segundo o eixo vertical numa faceta vertical, Figura 44, que apresenta trações na interface, segundo o eixo vertical.

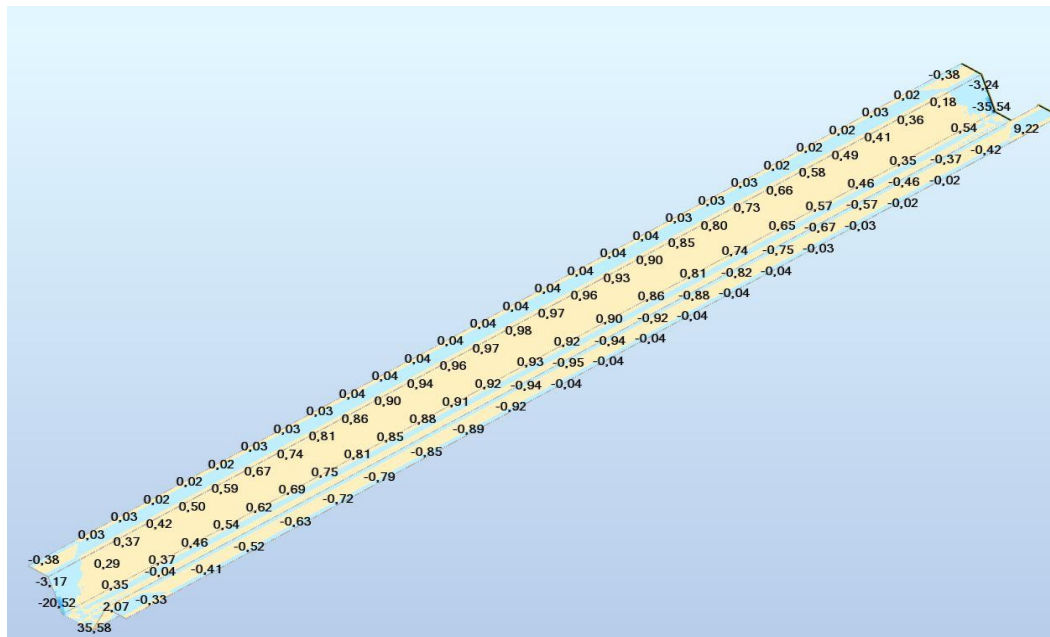


Figura 44 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Trapezoidal)

Do estudo da secção trapezoidal, há ainda a referir que na chapa perfilada verificam-se trações segundo o eixo horizontal, perpendicular ao vão, Figura 46. Estas são transmitidas pelo volume de betão encerrado entre almas da chapa perfilada (Figura 45).



Figura 46 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal)

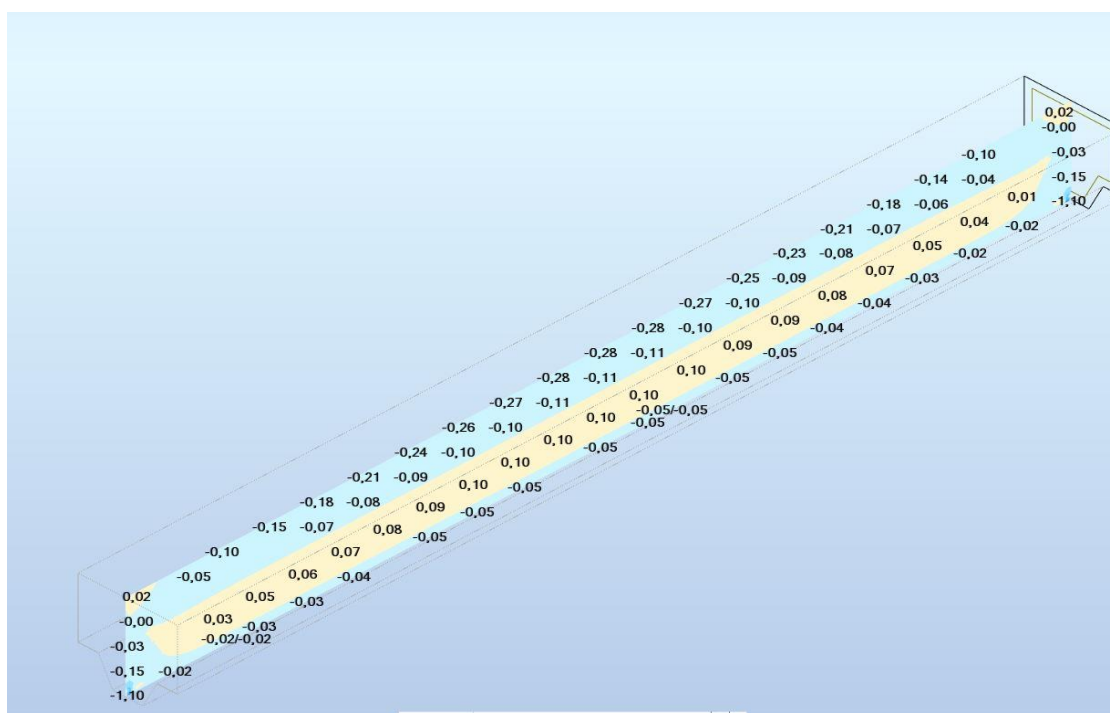


Figura 45 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Trapezoidal)

4.2.2 - Secção Reentrante

À semelhança do estudo desenvolvido para a secção trapezoidal, criou-se um modelo de EF para a secção reentrante, mantendo as condições de apoio, características dos materiais, vão de cálculo, carga distribuída e o tamanho da malha de EF.

Analisando a secção reentrante, verifica-se que tem comportamento adequado e compatível com os pressupostos da investigação. Para uma carga distribuída de 20 kN/m² o modelo de cálculo, apresenta trações em toda a chapa, Figura 47, e de magnitude 8,91 MPa.

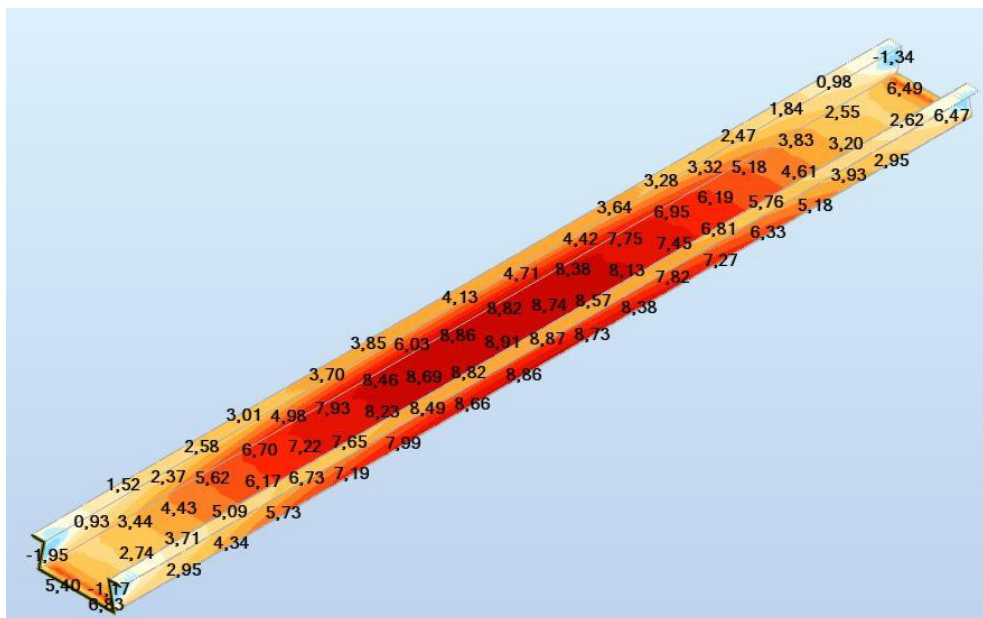


Figura 47 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)

Observando as tensões segundo o eixo longitudinal da secção de betão, Figura 48, conclui-se que o comportamento está em conformidade com o de elementos solicitados à flexão. Para a carga de estudo, 20 kN/m² verifica-se que existem compressões de 1.44 MPa na face superior do betão e trações de 1.48 MPa na face em contacto com a chapa perfilada.

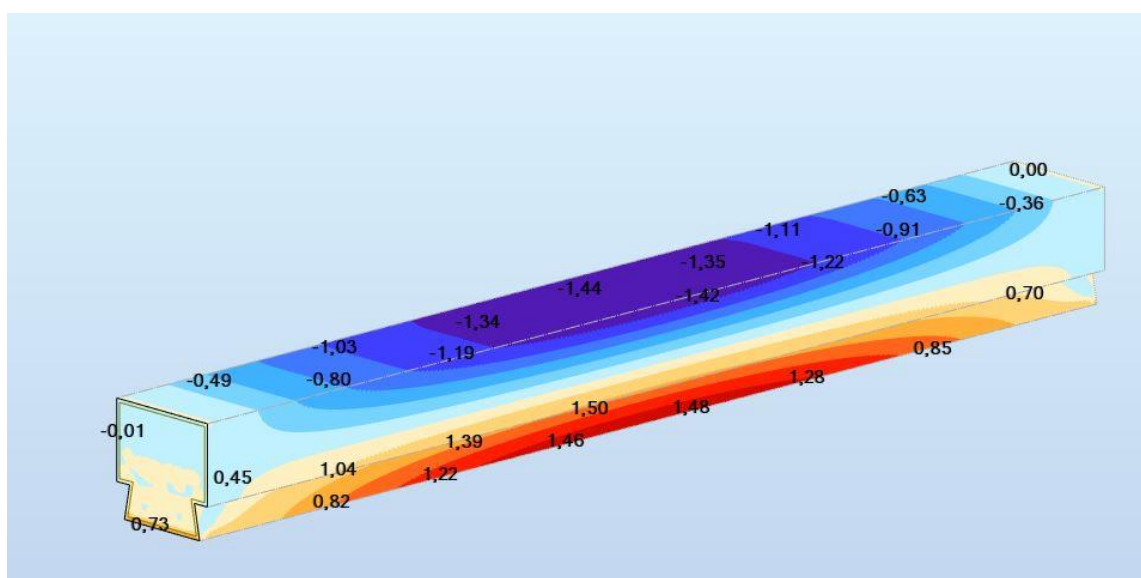


Figura 48 - Tensões, σ_{xx} , no betão (Secção Reentrante)

Com base na análise de tensões, considera-se que o modelo está adequado ao comportamento real da secção composta e traduz o comportamento real da secção, sendo válido para o estudo de tensões na interface aço betão.

Analisando as tensões tangenciais na interface aço-betão observa-se a distribuição simétrica ao longo do vão e com eixo de simetria a meio vão (Figura 49). As tensões têm magnitude crescente ao longo do vão embora o valor máximo não se verifique no extremo do vão, devido ao efeito das condições de apoio, mas sim nos 0,05 x vão (m) dos apoios, sendo esta a zona preferencial de rotura por corte longitudinal.

Para o caso em estudo, laje simplesmente apoiada com 2m de vão livre, solicitada por uma carga distribuída de 20 kN/m², a tensão de corte longitudinal, τ_{yx} , máxima verificada é 0,70 MPa, Figura 42.

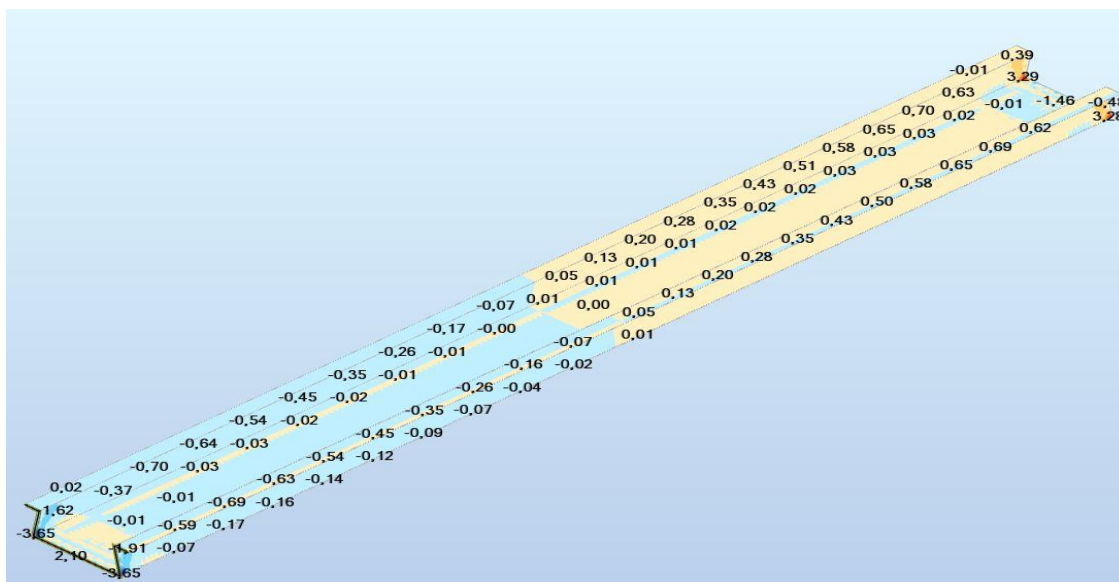


Figura 49 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Reentrante)

Atento nas tensões tangenciais com orientação perpendicular à chapa perfilada observam-se as forças resultantes do “efeito de cunha” descrito no subcapítulo 2.1 - Composição e comportamento, sendo estas a responsáveis pela encurvadura local das almas.

Dada a orientação tridimensional das forças, o fenómeno é apenas perceptível pela decomposição de forças ao longo dos eixos coordenados, analisando-se assim apenas as componentes verticais resultantes do “efeito de cunha”.

No caso em estudo, verifica-se que a secção crítica é, também a 0,05 x vão (m) dos apoios, apesar de as forças na zona superior da alma da chapa perfilada apresentarem orientação descendente e maior magnitude que as atuantes na zona inferior da alma, que têm orientação ascendente, Figura 50. Na secção mais solicitada a força descendente tem 0,22 MPa de intensidade, conjugada com a força ascendente de intensidade próxima de 0 MPa.



Figura 50 -Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Reentrante)

Ao longo de todo o vão, verificam-se as forças de separação dos materiais conforme descrito no subcapítulo 2.1.3 - Interface aço-betão. Em flexão, os materiais com deformabilidade diferente, tendem a separar-se. No caso em estudo este fenómeno não se verifica pois as tensões calculadas segundo o eixo vertical numa faceta vertical, Figura 51, não apresentam trações que produzem separação vertical dos materiais, nas almas.

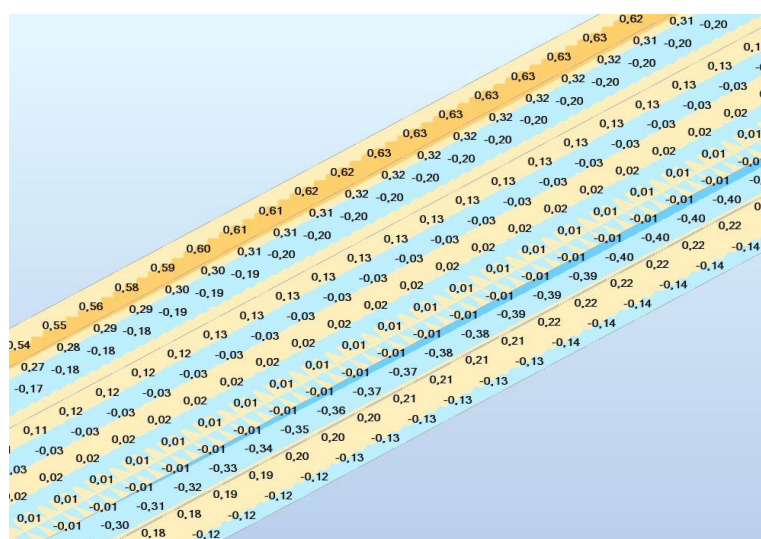


Figura 51 - Tensões de separação dos materiais ao lo longo da interface aço-betão (Secção Reentrante)

Da análise das tensões de separação vertical na chapa perfilada com secção reentrante, observa-se que as forças de separação vertical têm orientação inversa face à secção trapezoidal e a magnitude é significativamente menor. Para este tipo de chapa, a separação dos materiais não ocorrerá ao nível das almas da secção.

Do estudo da secção reentrante, há ainda a referir que as trações segundo o eixo horizontal, perpendicular ao vão, Figura 52, têm menor magnitude comparativamente à secção trapezoidal. Na Figura 53, observa-se também que a chapa perfilada está sujeita a trações segundo o eixo perpendicular à nervura. O mesmo tipo de tensões foi observado na chapa perfilada com secção trapezoidal e a intensidade das tensões é também próximo da solução estudada previamente.

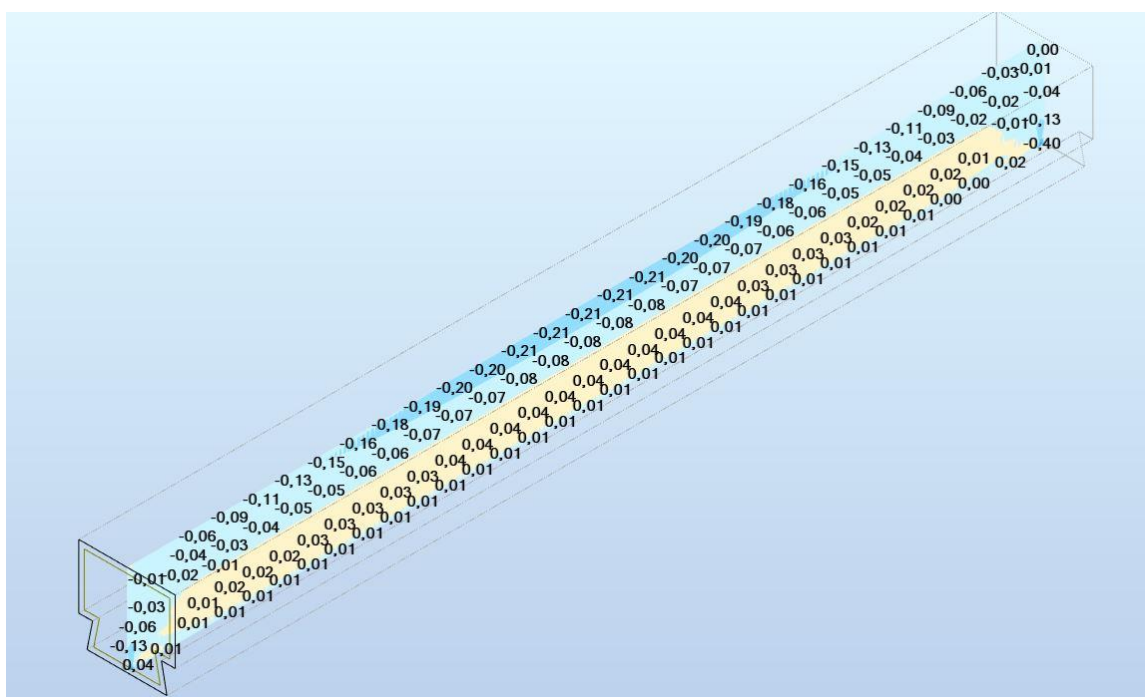


Figura 52 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Reentrante)

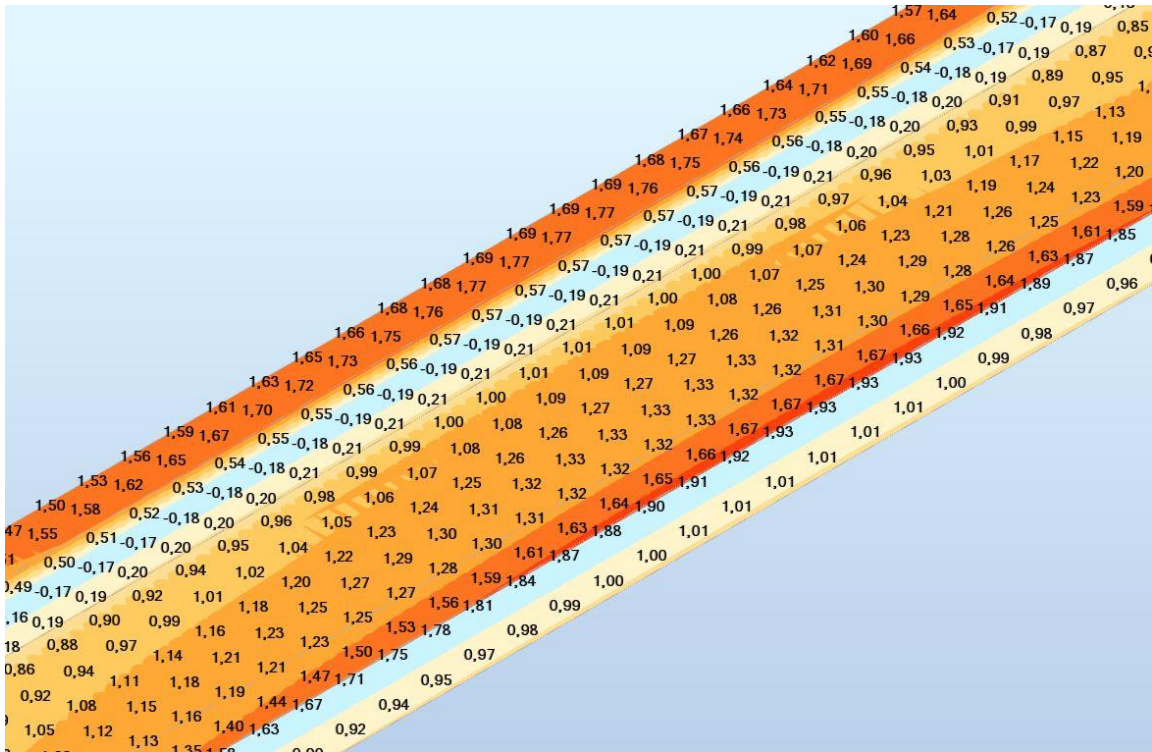


Figura 53 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)

4.2.3 - Secção Retangular

O estudo desenvolvido para a chapa perfilada com secção trapezoidal e reentrante é agora aplicado à secção retangular. Verifica-se que o modelo construído tem comportamento adequado e compatível com os pressupostos da investigação. Para uma carga distribuída de 20 kN/m² o modelo de cálculo, apresenta trações em toda a chapa, Figura 40, e magnitude 12,90 MPa.

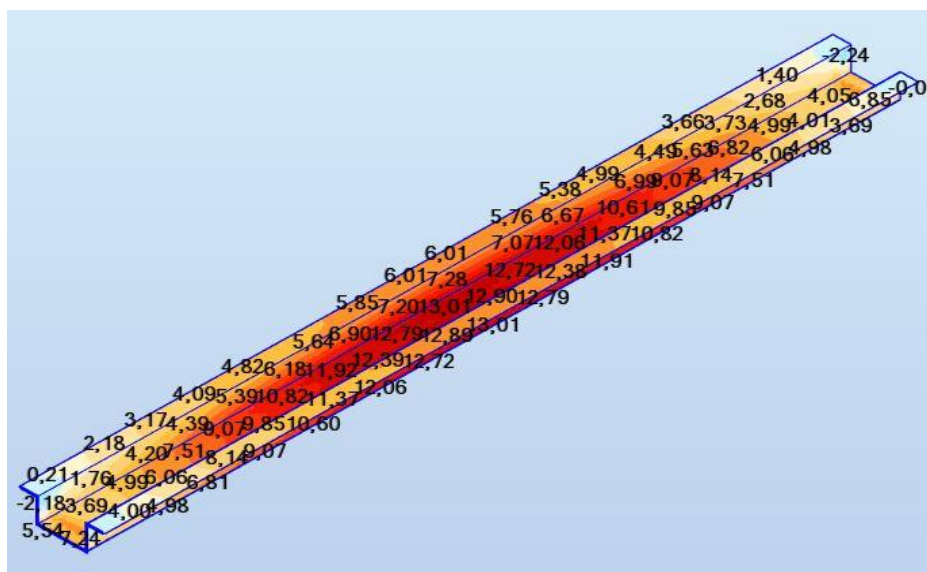


Figura 54 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Retangular)

Observando as tensões segundo o eixo longitudinal da secção de betão, Figura 55, conclui-se que o comportamento está em conformidade com o de elementos solicitados à flexão. Para a carga de estudo, 20 kN/m² verifica-se que existem compressões de 1,90 MPa na face superior do betão e trações de 2,16 MPa na face em contacto com a chapa perfilada.

Com base na análise de tensões, considera-se que o modelo está adequado ao comportamento real da secção composta e traduz o comportamento real da secção, sendo válido para o estudo de tensões na interface aço betão.

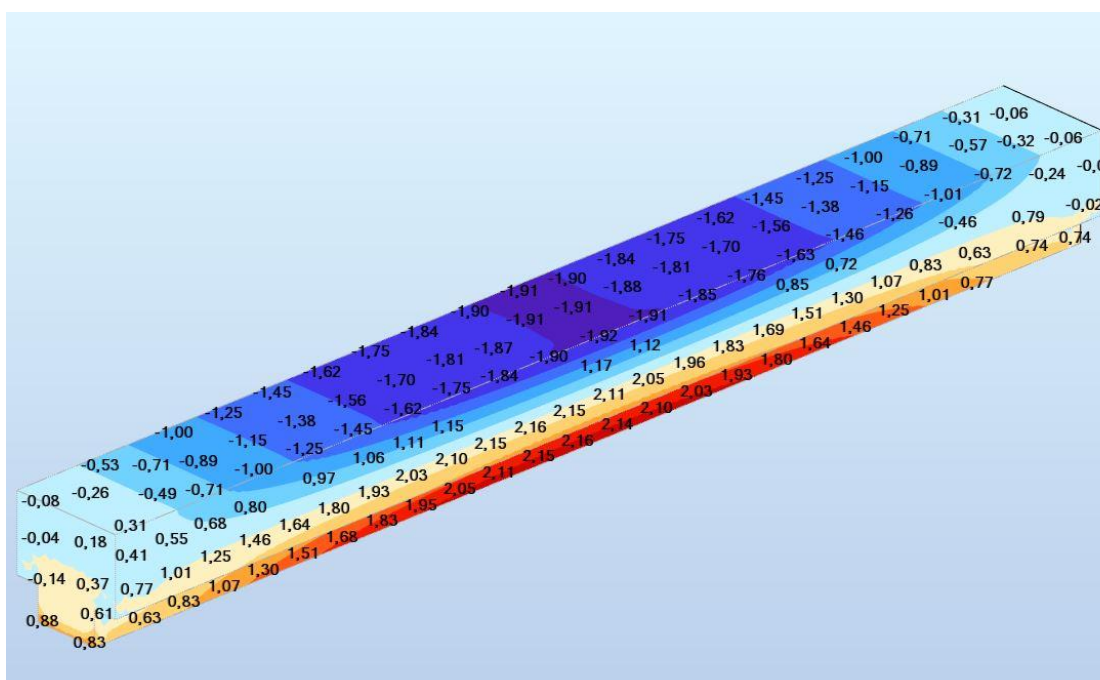


Figura 55 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Retangular)

Analisando as tensões tangenciais na interface aço-betão, observa-se a distribuição simétrica ao longo do vão e com eixo de simetria a meio vão, Figura 56. As tensões têm magnitude crescente ao longo do vão apesar de o valor máximo não se verificar no extremo do vão, devido ao efeito das condições de apoio, mas sim nos 0,05 x vão (m) dos apoios, sendo esta a zona preferencial de rotura por corte longitudinal. Para o caso em estudo, laje simplesmente apoiada com 2m de vão livre, solicitada por uma carga distribuída de 20 kN/m², a tensão de corte longitudinal, τ_{yx} , máxima verificada é 0,66 MPa (Figura 56).

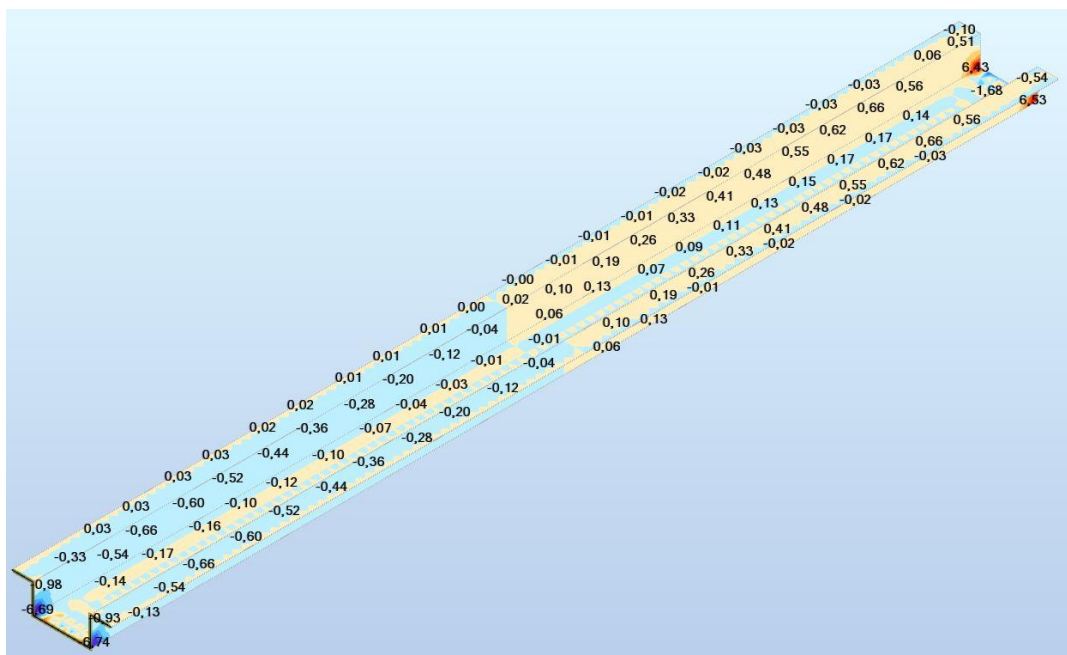


Figura 56 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Retangular)

Atento nas tensões tangenciais com orientação perpendicular à chapa perfilada observam-se as forças resultantes do “efeito de cunha” descrito no subcapítulo 2.1.3 - Interface aço-betão, sendo estas a responsáveis pela encurvadura local das almas.

Dada a orientação tridimensional das forças o fenómeno é apenas perceptível pela decomposição de forças ao longo dos eixos coordenados, pelo que se analisam apenas as componentes verticais resultantes do “efeito de cunha”.

No caso em estudo, a secção crítica é, também a $0,05 \times$ vão (m) dos apoios, como já foi referido, embora se verifique compressão nas almas nas zonas adjacentes aos banzos, e trações na zona central da alma (Figura 57).

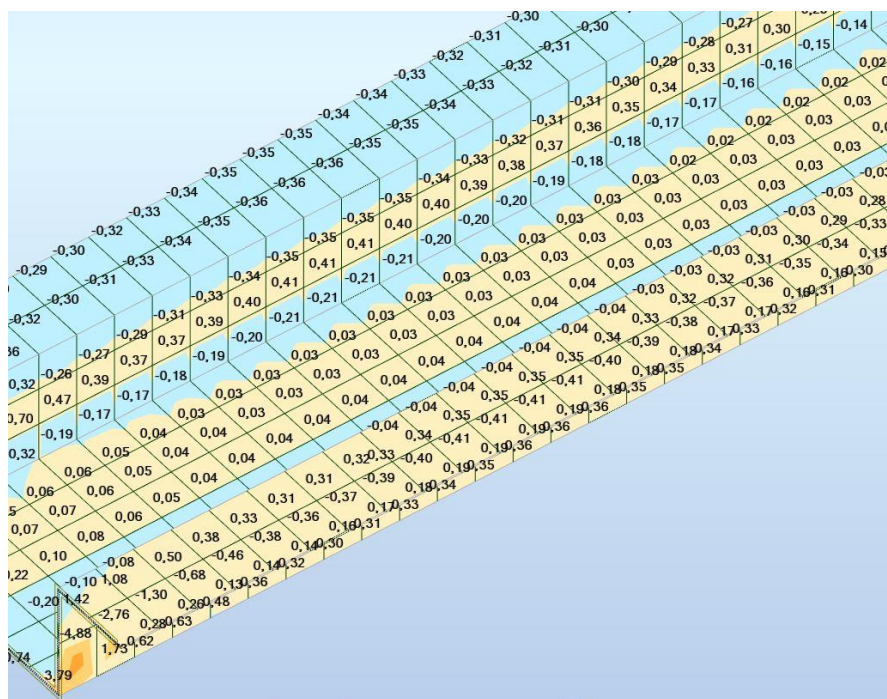


Figura 57 - Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Retangular)

Ao longo de todo o vão verificam-se as forças de separação dos materiais conforme descrito no subcapítulo 2.1.3 - Interface aço-betão.

Em flexão, os materiais com deformabilidade diferente, tendem a separar-se. Pelo estudo apresentado, as tensões calculadas segundo o eixo vertical numa faceta vertical, (Figura 58) não produzem trações de separação dos materiais ao nível das almas, verificando-se apenas no banzo superior da chapa perfilada.

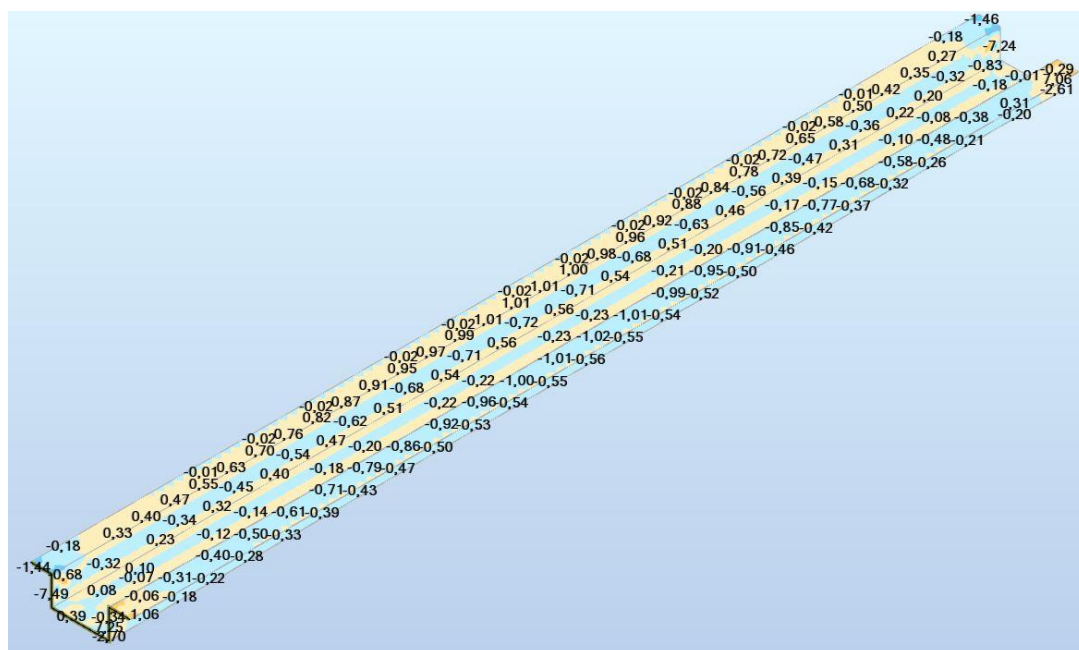


Figura 58 - Tensões de separação dos materiais ao lo longo da interface aço-betão (Secção Retangular)

Do estudo da secção retangular, há ainda a referir que no betão verificam-se trações da intensidade 0,07 MPa segundo o eixo horizontal, perpendicular ao vão, Figura 59. As trações apresentadas a amarelo no desenho localizam-se no interior do betão à altura do banzo superior da chapa perfilada, sendo estas absorvidas pela chapa e conseqüentemente verificam-se trações transversais em toda a secção, Figura 60.

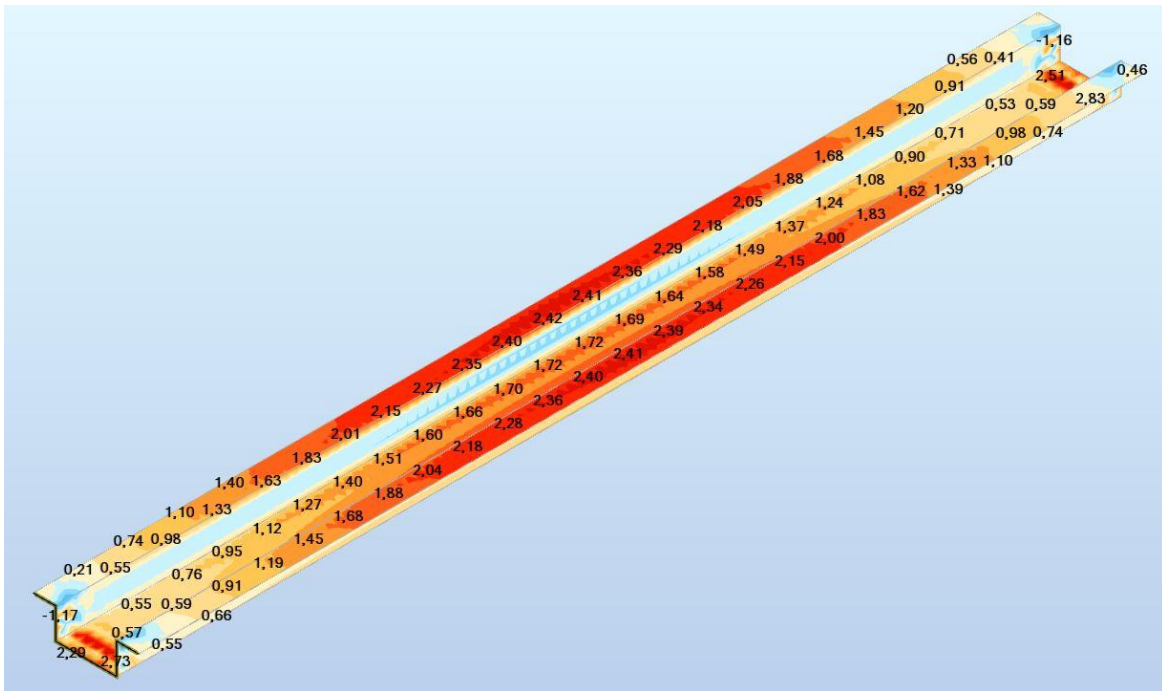


Figura 60 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Retangular)

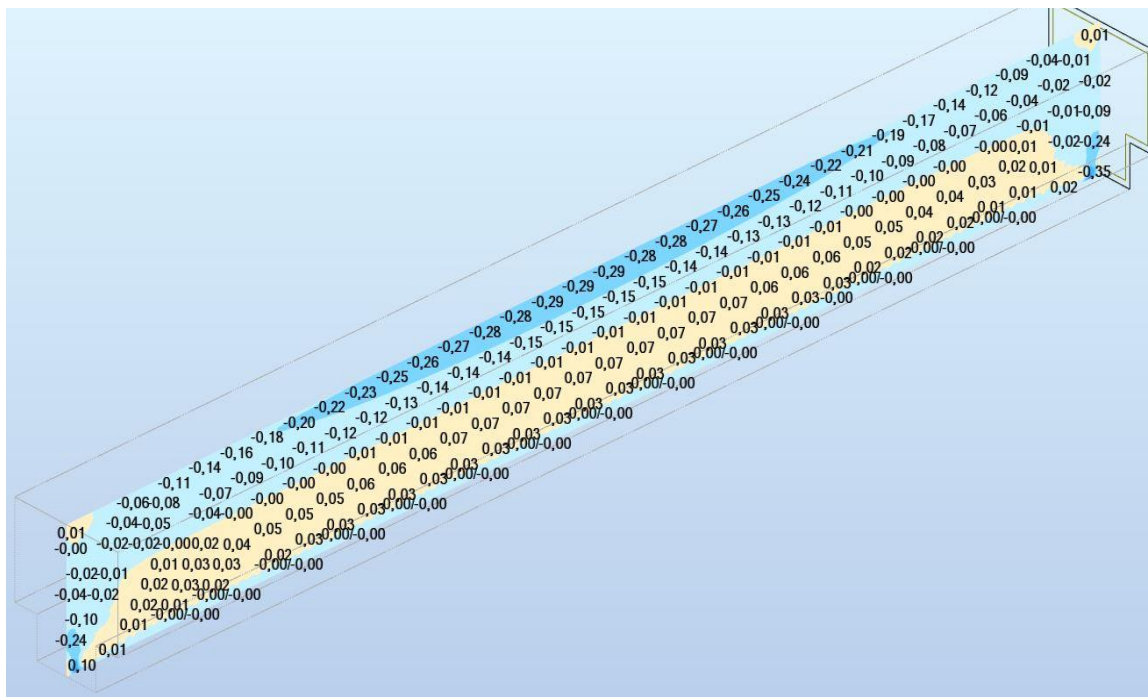


Figura 59 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Retangular)

4.2.4 - Análise dos resultados

Após a construção dos modelos e a observação dos resultados para as três secções de chapas perfiladas comparam-se as tensões resultantes da situação de carga e condições de apoio em estudo.

Observando as tensões instaladas na chapa perfilada conclui-se que a chapa trapezoidal tem maior sollicitação segundo o eixo longitudinal, x , (paralelo ao vão), com 13,06 MPa de intensidade superior à secção reentrante que apresenta uma tensão de 8,91 MPa, quanto à secção retangular, neste ponto aproxima-se do comportamento da chapa trapezoidal, com 12,90 MPa.

No betão, a solução com maior sollicitação segundo o eixo longitudinal, x , (paralelo ao vão), é a retangular que apresenta compressões na ordem dos 1,90 MPa e trações na ordem dos 2,14 MPa, seguida da secção trapezoidal que apresenta compressões na ordem dos 1,80 MPa e trações de 1,80 MPa. Por fim a secção reentrante é a que apresenta a menor sollicitação no betão com compressões de 1,46 MPa e trações de igual intensidade.

Analisando a interface aço betão, a secção reentrante apresenta tensões tangenciais ao longo das almas com intensidade de 0,70 MPa, superiores às da secção trapezoidal, 0,65 MPa e às da secção retangular, 0,66 MPa. Neste ponto, há a observar que, a secção reentrante sendo friccional, não apresenta bossas nas almas para resistir às tensões, enquanto a secção trapezoidal apresenta um nível tensões menor e está munida de bossas nas almas para promover o “efeito de cunha”, resistindo mecanicamente ao fenómeno.

No caso das forças transversais às de corte longitudinais, em todas as secções, estas têm intensidades compreendidas entre 0,65 e 0,70 MPa, o que se traduz em tensões de flexão nas almas da chapa perfilada. Paralelamente a esta distribuição de tensões verificam-se trações transversais no núcleo de betão compreendidas entre banzos das chapas perfiladas e trações transversais no banzo inferior de todas as chapas perfiladas. No caso da secção retangular verifica-se tração transversal na chapa perfilada, com o dobro da magnitude das restantes, 2,40 MPa.

Quanto ao fenómeno de separação vertical, analisaram-se as tensões tangenciais, segundo uma faceta paralela ao plano YoZ , sendo y o eixo perpendicular ao vão e z o eixo vertical perpendicular a Y e com sentido Z ,

verificando-se que na secção reentrante estas têm sinal negativo resultante de forças descendentes que não promovem o fenómeno de separação vertical. Na secção trapezoidal verificam-se tensões com sinal positivo, resultantes de forças tangenciais positivas que promovem a separação vertical dos materiais aço e betão, com intensidade máxima 0,98 MPa, verificada a meio vão.

. Quanto à secção retangular as tensões apresentam uma distribuição parabólica apresentando tensões positivas junto aos banzos e negativas nas almas.

Analisando globalmente as tensões da secção trapezoidal, observa-se que em cada módulo de chapa a carga é encaminhada, pelo betão, desde a face superior da laje até à chapa perfilada, com recurso às bossas das almas, que encaminham as forças até ao banzo inferior da chapa.

Com base na análise de tensões efetuada no subcapítulo 4.2 - Análise de tensões, conclui-se que a secção trapezoidal permite utilizar o material, aço, de uma forma mais eficiente. Face à eficiência da secção trapezoidal, pretende-se construir um modelo de escora e tirantes que permita traduzir o equilíbrio de forças da laje em flexão.

4.3 - Direções principais de tensão

Recolheram-se os valores de todas as tensões em vários pontos da secção e construíram-se os respetivos tensores de tensões (Expressão 18), de forma a identificar as variações de orientação dos eixos principais ao longo do vão da laje.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} (\text{MPa})$$

Expressão 18 - Tensor das tensões

Com base nos tensores de tensões em vários pontos calcularam-se as tensões principais e os eixos principais nos vários pontos e posteriormente foram desenhados na secção de forma a elucidar quais as direções principais das tensões. Na Figura 61 apresenta-se a vista em planta das direções principais, atuantes na interface aço-betão na zona em que o esforço de corte longitudinal tem maior intensidade, sendo que o comprimento do vetor depende da intensidade da tensão principal.

Observa-se que a tensão preponderante tem orientação do interior do bloco de betão para a chapa perfilada e descreve um ângulo crescente desde o meio vão até ao apoio, segundo um plano horizontal que intercepta as almas da secção. O eixo principal, segundo este plano, descreve um ângulo nulo e tende a aumentar conforme o ponto de tensão se aproxima do apoio. No estudo desenvolvido, o referido ângulo, descreve um ângulo máximo de 30° para a uma tensão de corte longitudinal de $0,64 \text{ MPa}$ na interface aço-betão.

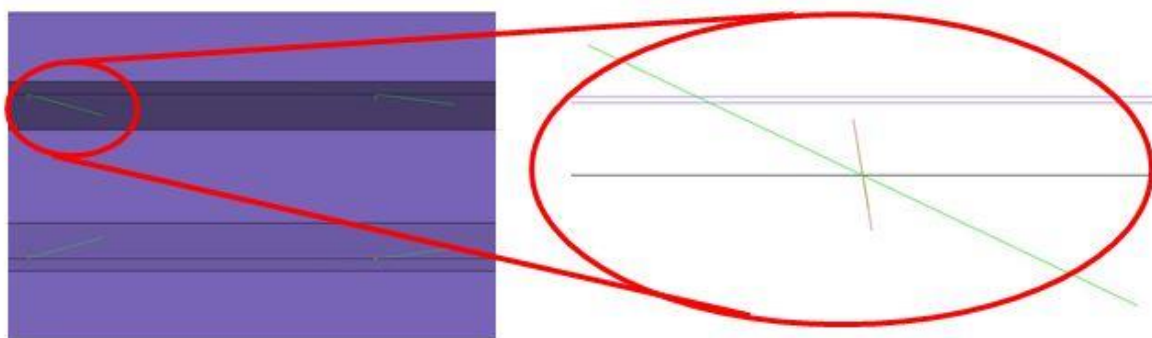


Figura 61 - Representação em planta dos eixos principais

Observando a representação da secção em corte, Figura 63, e o alçado, Figura 63, a tensão principal σ_1 tem orientação próxima de horizontal, descrevendo um ângulo de 3° com o eixo vertical, e tem $-3,17 \text{ MPa}$ de intensidade. Esta tensão é negativa descrevendo compressão no ponto de cálculo, segundo esta direção principal. Quanto à tensão σ_2 verifica-se que a maior componente do vetor principal descreve-se segundo o eixo vertical e desvia-se da verticalidade em 25° em relação ao plano XoZ e 2° em relação ao XoY . A tensão principal σ_2 tem magnitude de $-0,56 \text{ MPa}$ e, sendo negativa, representa compressão, no ponto de cálculo, segundo o eixo principal Y .

No que respeita à orientação a tensão principal σ_2 , ao longo do vão, tende a inclinar-se segundo o plano XoZ e, a meio vão, o ângulo de desvio é 0° . A inclinação segundo o plano XoY é constante ao longo de todo o vão.

Por fim, analisando a tensão principal σ_3 , tem orientação perpendicular às almas da secção trapezoidal segundo o eixo YoZ , descrevendo um ângulo de 10° em relação ao plano horizontal XoY que passa no ponto de tensão. Atento no alçado de tensões (Figura 62, observa-se que descreve um ângulo de aproximadamente 40° em relação ao plano YoZ . A tensão principal σ_3 tem

intensidade de 0,12 MPa e, sendo positiva representa tração, que pela análise desenvolvida no subcapítulo 4.2.1 - Secção Trapezoidal, se verifica no núcleo de betão do compreendido entre as almas do módulo de chapa e pelo subcapítulo 2.1.1 - Ligação aço-betão, irá fletir localmente as almas da chapa perfilada.

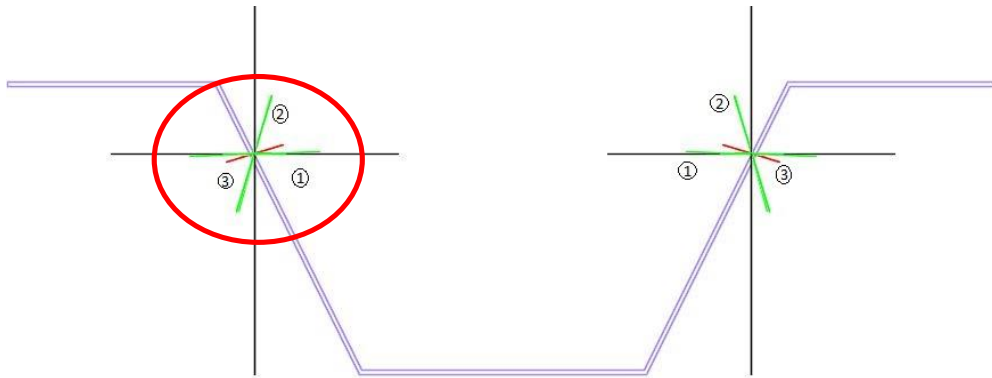


Figura 63 - Representação em corte transversal dos eixos principais

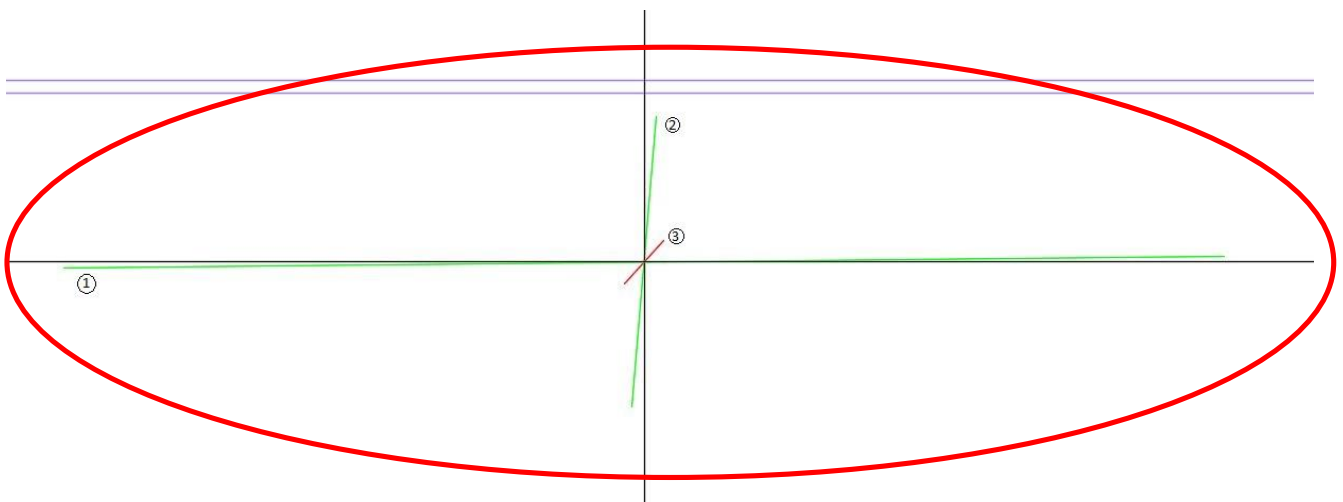


Figura 62 - Representação em alçado dos eixos principais

Analisando a orientação em todos os pontos de cálculo, sendo alguns representado esquematicamente na Figura 64, observa-se que, na secção a meio vão da laje as direções principais têm orientações próximas das direções ortogonais XYZ, e tendem a sofrer desvios conforme se afastam da secção central do vão. Os desvios máximos, dos eixos principais, verificam-se nas secções em que a tensão de corte longitudinal é máxima.

Globalmente, as tensões principais têm carácter bi-simétrico em relação ao meio vão segundo o eixo YoZ e em relação ao eixo do módulo de chapa perfilada segundo o eixo XoZ.

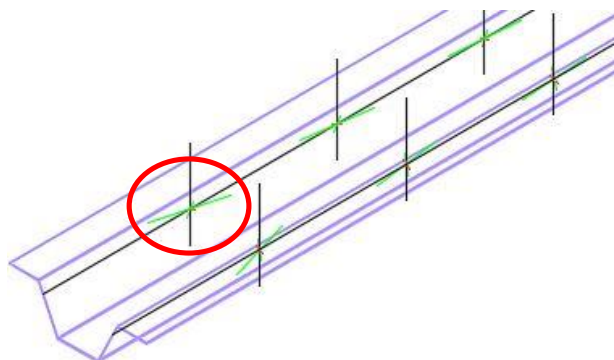


Figura 64 - Representação tridimensional dos eixos principais

4.4 - Modelo de escoras e tirantes

Após o estudo do estado tensão dos materiais aço e betão, bem como da superfície de interface entre eles, propõe-se um modelo de escoras e tirantes adequado à solução estrutural em estudo e que esteja de acordo com as observações apontadas ao longo de todo o trabalho de investigação.

O modelo de escoras e tirantes proposto é baseado no estudo das tensões atuantes que foi desenvolvido e tem como objetivo compreender o comportamento estrutural deste sistema construtivo. Neste subcapítulo, representam-se a vermelho as trações e a verde as compressões esperadas na estrutura face à solicitação e condições de apoio que foram estabelecidas anteriormente, um módulo de chapa perfilada com 2m de vão e simplesmente apoiada.

Na treliça virtual a solicitação é distribuída pela superfície da laje transformada em cargas concentradas, representadas com “F”, aplicadas nos nós identificados com o número 1 nas Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Figura 68 das cordas superiores da treliça de betão. Esta treliça é formada por duas cordas superiores e duas inferiores sendo que as primeiras encontram-se ao nível superfície da laje e as inferiores ao nível do centro de gravidade da chapa perfilada. Baseado no estudo das tensões principais, propõem-se os ângulos da Figura 65 para a construção do modelo virtual.

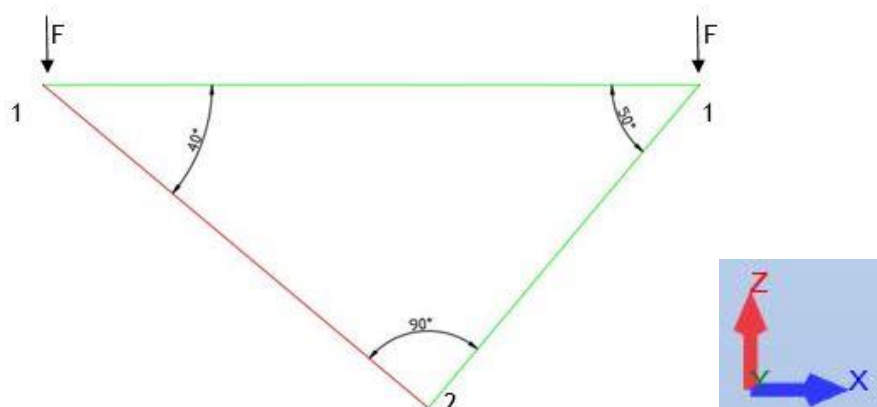


Figura 65 - Inclinação das escoras e tirantes da treliça de betão

Nos nós das cordas inferiores, identificados nas referidas imagens com o número “2”, a treliça de betão liga-se à chapa metálica através de escoras de betão inclinadas tridimensionalmente. A orientação destas coincide com a orientação da tensão principal, σ_1 , descrita no subcapítulo 4.3. O nó identificado com o número “3”, traduz a ligação aço betão, e permite quantificar o esforço transmitido às bossas da chapa perfilada e dimensioná-las. Uma vez que esta escora tem orientação tridimensional, pode ser decomposta nas suas componentes verticais e horizontais. As verticais (segundo o eixo yy) são equilibradas através de trações nas almas da chapa perfilada. As componentes horizontais (segundo o eixo xx) são equilibradas tracionando longitudinalmente os banzos superior e inferior da secção. Por fim as componentes (segundo o eixo yy) serão equilibradas a dois níveis. Ao nível do banzo superior, por tração no núcleo de betão, este esforço provocará fissuração. Após se verificar este fenómeno geram-se trações transversais ao nível do banzo superior da chapa perfilada que serão equilibradas pelos módulos adjacentes da laje. Quanto às componentes inferiores, estas serão equilibradas por tração transversal do banzo inferior da chapa perfilada.

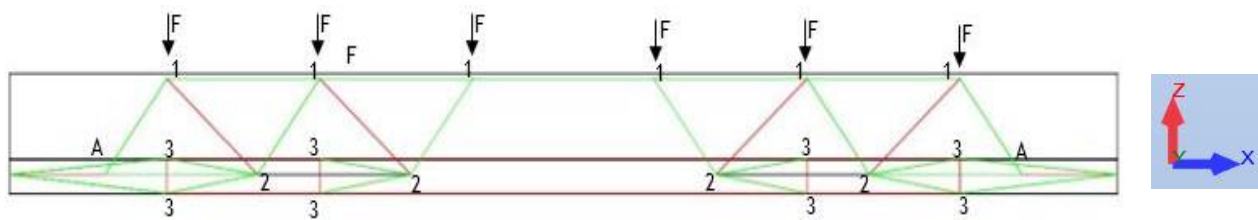


Figura 66 - Alçado do modelo de escoras e tirantes

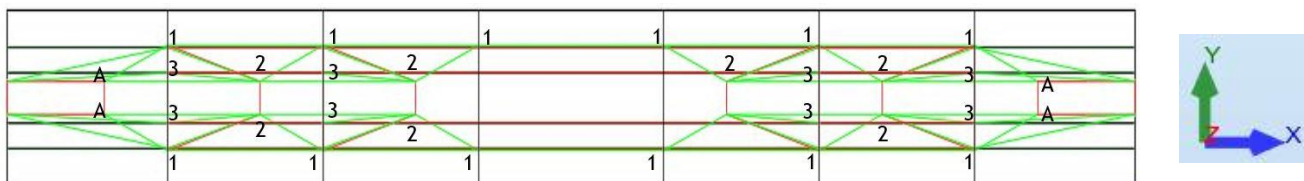


Figura 67 - Planta do modelo de escoras e tirantes

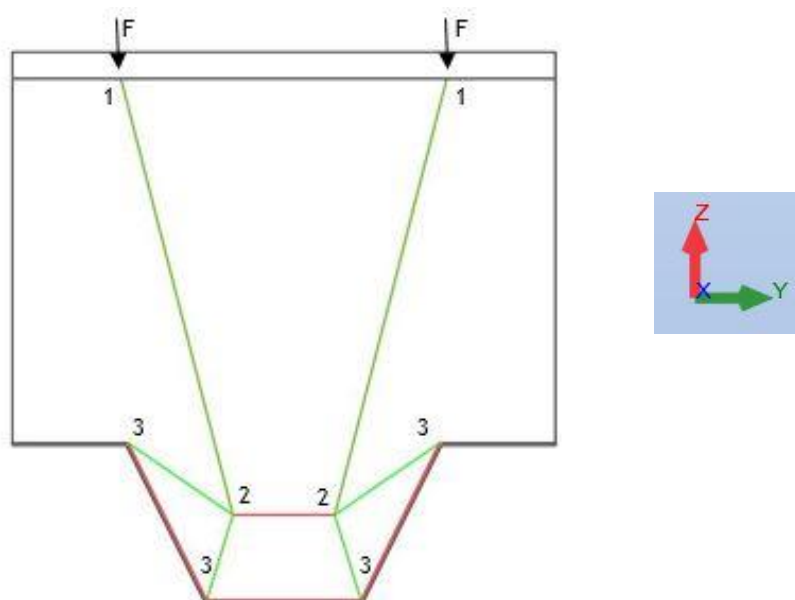


Figura 68 - Corte do modelo de escoras e tirantes

Na Figura 66 representam-se as zonas de apoio com a letra “A”. Nestes nós, foram considerados apoios simples e compatibilizaram-se os esforços atuantes na chapa perfilada. Neste processo considerou-se a chapa de topo colocada em obra nas extremidades da chapa perfilada de remate à laje, que tem como função equilibrar os esforços de tração gerados na chapa perfilada. Nos nós identificados com os números “1” e “3”, consideram-se apoios que limitam o deslocamento segundo o eixo dos yy, com os quais se pretende simular o feito dos vários módulos de chapa integrantes de uma laje colaborante.

De forma a clarificar o modelo proposto foram construídos modelos físicos e virtuais que foram evoluindo ao longo de todo o processo de investigação que se apresentam na Figura 69 e Figura 70.

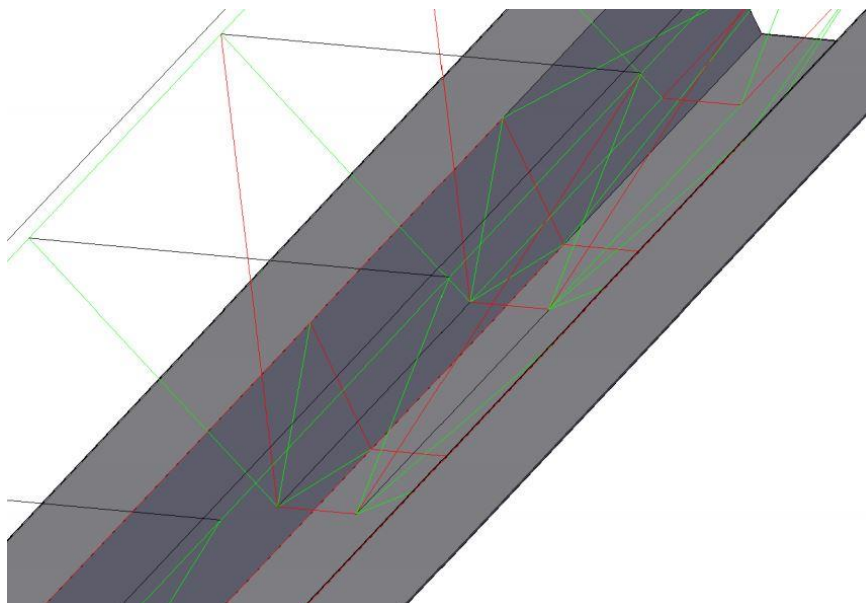


Figura 69 - Modelo Virtual de escoras e tirantes



Figura 70 - Modelo físico de escoras e tirantes

4.5 - Caminho de carga

O caminho da carga tem carácter simétrico em relação ao meio vão e transversalmente é simétrico em relação ao eixo longitudinal (Figura 71) As cargas são encaminhadas desde a face superior da laje até a chapa perfilada através das bielas de betão.

De acordo com o subcapítulo 4.4 - Modelo de escoras e tirantes as forças verticais são encaminhadas desde os nós identificados com o número “1” até aos nós representados o número “3”, sendo que no nó “2” existe a referida escora espacialmente inclinada que liga a escora de betão com o chapa perfilada.

Assim o caminho de carga descrito pela força na laje inicia-se nos nós numero “1” de onde é encaminhada pela treliça de betão até aos nós número “2”, que posteriormente encaminham o esforço até aos nós da interface identificados com o número “3” e conseqüente encaminhadas para os apoios pela chapa perfilada.

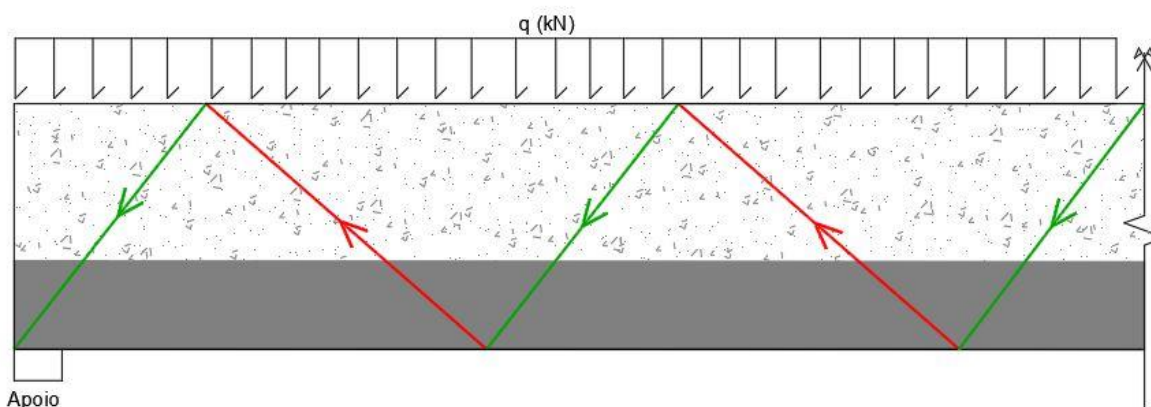


Figura 71 - Caminho de carga (Secção Trapezoidal)

4.6 - Aplicação com modelo de escora e tirantes

Recorrendo ao modelo virtual de escoras e tirantes descrito no subcapítulo 4.4 - Modelo de escoras e tirantes e tendo por base a informação técnica fornecida pelo fabricante da chapa perfilada, H60, construiu-se virtualmente o modelo recorrendo ao software ROBOT [30].

Pelas tabelas de dimensionamento do fabricante, a laje com 2m de vão e 20cm de espessura tem $4,10 \text{ kN/m}^2$ de peso próprio e resiste a uma sobrecarga de $18,67 \text{ kN/m}^2$. Concentrando a carga distribuída em forças nodais obtém-se a carga de $0,57 \text{ kN}$ de intensidade, aplicada em cada nó das cordas superiores do modelo.

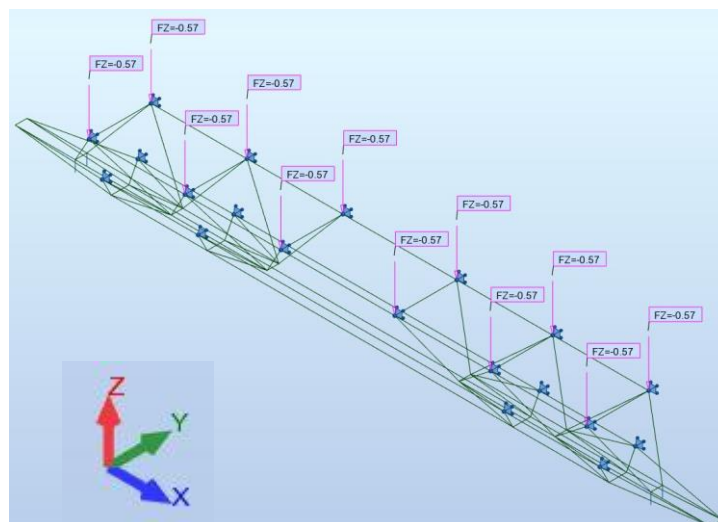


Figura 72 - Modelo de escora e tirantes contruído no software

Dos resultados do modelo espera-se que as cordas superiores e inferiores da treliça de betão estejam sujeitas a esforços de compressão e nas diagonais existam esforços de compressão e tração alternados. As diagonais espaciais que ligam a treliça de betão aos tirantes de aço, deverão apresentar esforços de compressão que serão equilibrados por trações nas bielas que traduzem a chapa perfilada.

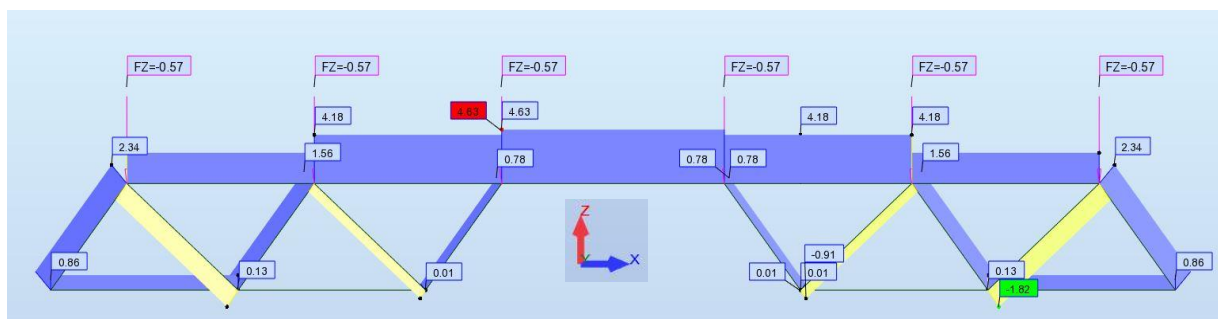


Figura 73 - Esforços na treliça de betão

Na Figura 73 apresentam-se os esforços atuantes recolhidos do software de cálculo. A convecção de sinais é oposta à convenção da resistência dos materiais, pelo que as compressões se apresentam com sinal positivo (diagrama exibido em azul) e a trações com sinal negativo (diagrama exibido a amarelo). Observa-se que a treliça de betão apresenta esforços compatíveis com os pressupostos do subcapítulo 3.2.2 - Modelo de escoras e tirantes. Verifica-se que as cordas superior e inferior da treliça apresentam apenas esforços de compressão, com intensidade de 4,63 kN na corda superior e 0,86 kN na corda inferior. As diagonais apresentam compressões e trações alternadas com compressão máxima de intensidade 0,13

kN e tração 1,82 kN. Na Figura 74, apresentam-se as escoras que transferem os esforços da treliça de betão para os tirantes da chapa metálica. Todos eles apresentam compressões como era espectável e têm intensidade máxima de 0,61 kN, sendo este o esforço atuante nas bossas da interface.

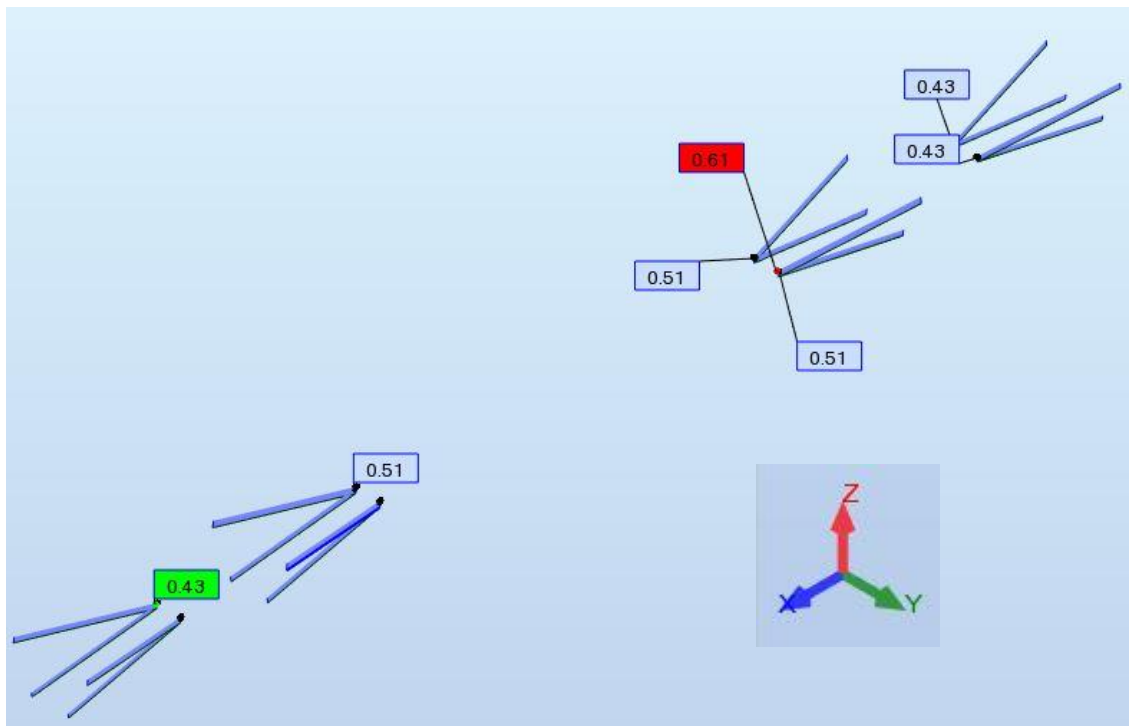


Figura 74 - Escoras de ligação entre os materiais

Na chapa perfilada, como era esperado, verificam-se trações em todas as componentes. Nos banzos superior e inferior, os esforços atuantes nas bielas que equilibram as escoras espaciais através da interface apresentam trações com intensidade de 0,63 MPa no banzo superior e 0,54 MPa no inferior (Figura 76). Como foi referido no subcapítulo 4.4 - Modelo de escoras e tirantes, as escoras espacialmente inclinadas são ainda equilibradas transversalmente segundo o eixo dos yy e verticalmente segundo as almas da chapa perfilada. No modelo construído os tirantes que traduzem estes desenvolvimentos da chapa também sofrem tração. Os tirantes que traduzem as almas da chapa perfilada são solicitados, no máximo com 0,12 kN e os tirantes do banzo inferior, segundo o eixo yy é tracionado com 0,09 kN. Apresentam-se os diagramas de esforço axial nas referidas bielas na Figura 75.

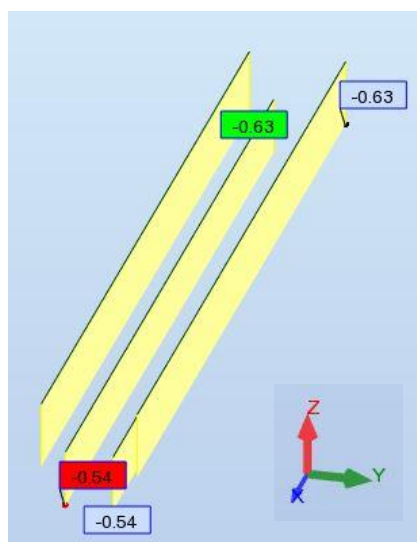


Figura 76 - Trações segundo o eixo xx ao nível dos banzos

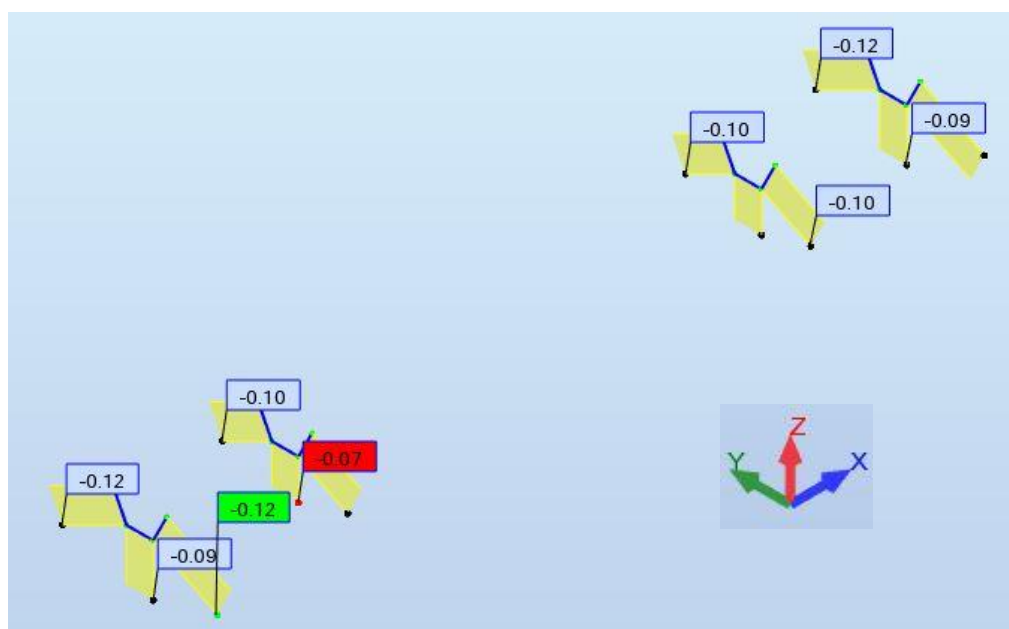


Figura 75 - Trações na chapa perfilada nas almas e no banzo inferior

Avaliados todos os esforços atuantes no modelo virtual de escoras e tirantes (STM), conclui-se que está em conformidade com os pressupostos iniciais e que os resultados são coerentes com os do modelo de elementos finitos (FEM). É perceptível que os nós identificados com o número “3” no subcapítulo 4.4 - Modelo de escoras e tirantes, são fundamentais para o equilíbrio da estrutura, dado que é através desta ligação que se garante o comportamento misto dos materiais.

Com base no modelo de escoras e tirantes (STM) proposto para a secção trapezoidal, procedeu-se à adaptação dos ângulos transversais da treliça de forma a compatibilizar o modelo com a secção reentrante (Figura 77).

Calcularam-se os esforços atuantes para a mesma carga, neste novo modelo e obtiveram-se os seguintes resultados: nas escoras inclinadas espacialmente, que transferem os esforços da treliça de betão para a chapa perfilada, a intensidade das compressões é 0,54 kN, as trações longitudinais, segundo o eixo xx, na chapa perfilada são inferiores às da chapa perfilada com secção trapezoidal atingindo a intensidade de 0,59 kN, relativamente às almas as trações máximas são 0,11 kN e no banzo inferior 0.08 kN. Assim conclui-se que os esforços atuantes na chapa perfilada reentrantes são próximos dos da chapa trapezoidal.

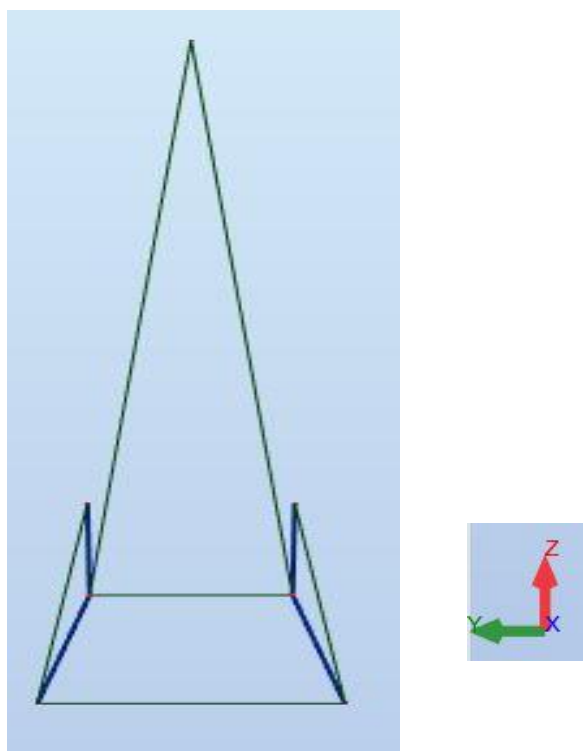


Figura 77 - Adaptação do STM à secção reentrante

4.7- Proposta de nova solução

Verificada a conformidade do modelo de escoras e tirantes (STM) com os modelos de elementos finitos (FEM), estuda-se a geometria espacial das bielas de forma a idealizar uma solução, para a interface, a qual mais eficiente que a da chapa perfilada H60.

As escoras de betão que ligam o ponto numerado com “2” ao numerado com “3” no subcapítulo 4.4 - Modelo de escoras e tirantes transferem à chapa perfilada os esforços gerados pela solicitação, para tal é essencial para a estabilidade da laje garantir a resistência máxima no ponto “3”.

Observando a orientações das escoras verifica-se que têm distribuição simétrica em relação ao meio vão indiciando que a solução a propor, para as bossas, deverá ser simétrica segundo o plano YoZ de forma a proporcionar pontos de apoio que sejam eficientes em ambas as extremidades do vão. Do ponto de vista da resistência da conexão, quanto maior for a espessura das bossas maior será a capacidade de a interface proporcionar o “efeito de cunha” às escoras de betão, e assim, maior será a resistência da interface e conseqüentemente a resistência global do elemento estrutural.

Aumentando a o relevo da bossa conduzirá a uma conexão com maior resistência máxima, mas também com rotura mais frágil. Perante este cenário idealiza-se uma solução para a conexão mecânica que aumente a resistência ao corte longitudinal, mas que não conduza o elemento estrutural a rotura do tipo dúctil. Para tal, pretende aumentar o relevo das bossas para 4mm, relativamente à solução H60, e distribuí-las ao longo das almas de forma mais eficiente. A referida chapa perfilada tem relevo arredondado, não sendo munida de uma superfície plana na bossa que possa servir de “cunha” ao betão. Na solução proposta idealizam-se cunhas com superfície plana com inclinação aproximada de 45°, de forma a transmitir os esforços de tração à chapa perfilada sem que exista deslocamento relativo entre os materiais, sendo este um cenário possível para a secção H60.

A solução H60, fornecida pelo fabricante, apresenta bossas orientadas a 45° e com distribuição antissimétrica (Figura 78), relativamente ao eixo XoZ. Nesta fase do estudo comprovamos que esta solução fornece apoio às escoras de ligação aço-betão em apenas uma das almas, a que tem bossas com orientação

perpendicular às referidas escoras concorrentes aos nós “3”. Na alma oposta a escora não mobiliza a resistência ao corte longitudinal, uma vez que a bossa não proporciona o “efeito de cunha”, e o betão tende a escorregar ao longo do relevo arredondado da bossa.



Figura 78 - Distribuição antissimétrica de bossas - chapa perfilada H60

A chapa perfilada H60 é construída em aço S320 GD+ Z275, e tem 1 mm de espessura, considerando uma capa perfilada construída com o mesmo material, para resistir às duas escoras, que transferem esforços aos banzos superiores e inferiores, com 0.61 kN de esforço serão necessárias bossas afastadas de 1cm entre elas com desenvolvimento total útil de 1.53 cm.

Na Figura 79, apresenta-se a solução proposta para a interface, qual apresenta um desenvolvimento total útil de 3 cm mas afastadas de 2 cm entre elas. É formada por um conjunto de duas bossas situadas na zona superior e inferior das almas. A superior tem desenvolvimento em forma de “V”, sendo a geometria justificada pela necessidade promover o “efeito de cunha” em ambas as extremidades do vão e em ambas as almas da chapa perfilada. Tem 1 cm de lado e forma ângulos de 66 graus em relação ao eixo horizontal x. A inferior é uma bossa sem inclinação e com 2cm de comprimento. Ambas as bossas serão construídas com 4mm de espessura de forma a maximizar a superfície de contacto entre o aço e o betão. A tensão resultante na superfície da bossa, para a solicitação em estudo será 1,2 MPa.

Tendo em conta que não se dispõe de tecnologia de cunhagem para construir as bossas, serão construídas recorrendo a varão de aço de 5mm de diâmetro, soldados às almas de chapas perfiladas e posteriormente rebarbados de forma a obter uma inclinação de 45°.

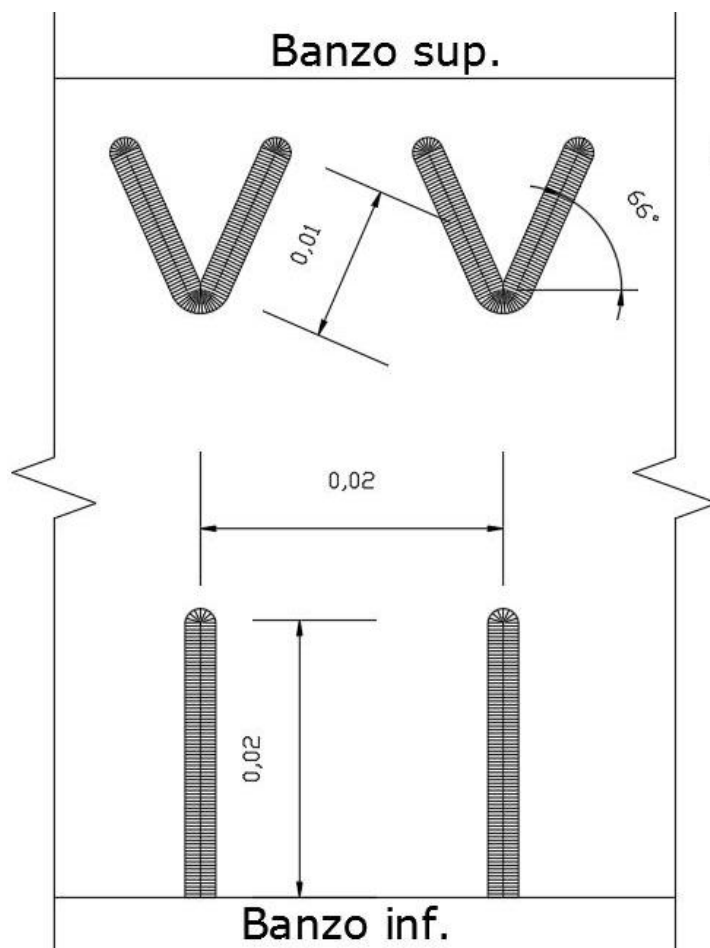


Figura 79 - Solução de proposta

Capítulo 5 - Metodologia Experimental

A metodologia experimental tem como objetivo comparar a solução existente, chapa perfilada H60, com a solução proposta no subcapítulo 4.7- Proposta de nova solução e descrever o método de colapso deste tipo de corpos de prova.

5.1- Construção de provetes

O material para a construção dos provetes foi cedido pelo fabricante da chapa perfilada H60[34], que forneceu perfis de secção UPN 120, UPN 80, chapa perfilada H60 e chapa perfilada com a mesma geometria da H60, mas sem bossas, que possibilitará a construção de bossas conforme a solução proposta.

Inicialmente, soldaram-se duas amostras de chapa perfilada perfil H60[34], com dimensões 0.30x0.205m, banzo inferior contra banzo inferior com pontos de solda afastados de aproximadamente 5cm entre eles (Figura 81). Posteriormente estes foram aplicados nos perfis UPN 120 e fixos com pontos de solda nas extremidades.



Figura 81 - Soldadura dos corpos de prova



Figura 80 - Soldadura dos corpos de prova

Na fase seguinte, executaram-se mais pontos de solda ao longo de toda a ligação entre as chapas perfiladas e os perfis UPN 120. De forma a melhorar a ligação entre a chapa perfilada os perfis UPN 120 furou-se a chapa perfilada e colocou-se solda para reforçar esta ligação entre os perfis e chapa perfilada. Perspetivando ensaios de arranque, com descrito no subcapítulo 3.2.3 - Método experimental, com reação no betão, soldaram-se frações da chapa perfilada na

extremidade inferior dos corpos de prova, sendo que estas terão a função de cofragem na betonagem e serão removidos antes da realização dos ensaios laboratoriais (Figura 82).

O processo descrito foi repetido duas vezes com chapa perfilada com bossas e outras duas com chapa lisa.



Figura 82 - Corpos de prova após construção da parte metálica

Aos provetes com chapa perfilada lisa, foram soldados varões de diâmetro 5mm para conferir o relevo característico das bossas produzidas pelo efeito de cunhagem. Esta solução pretende aproximar o relevo das bossas ao resultante do processo de cunhagem, visto que não existe matriz para a geometria proposta. Posteriormente, todos os varões foram rebarbados de forma a conferir um ângulo de 45° e 4mm de espessura às “bossas” (Figura 84), pretendendo assim simular o resultado final do processo de fabrico por equipamentos de cunhagem e quinagem como foi observado na visita á fábrica da empresa O FELIZ em Celeirós. Após concluída a fase de construção metálica (Figura 83), utilizou-se aglomerado de madeira MDF para construir cofragens garantindo uma espessura de betão de 10cm sobre cada chapa perfilada.



Figura 84 - Rebarbagem de varões



Figura 83 - Proвете construído com solução proposta

Seguidamente, os provetes foram betonados com betão C25/30, cedido por uma central de betão, e vibrados. Aguardou-se que os corpos de prova ganhassem resistência durante 28 dias a temperatura média de 20°C (Figura 85).



Figura 85 - Cura dos provetes

Desta fase resultaram quatro corpos de prova com as seguintes características:

Ref. Corpo de prova	Altura total (mm)	Largura do módulo de chapa (mm)	Espessura da camada de betão (mm)	Bossas das almas	Relevo das bossas (mm)
CP.1.H60	380	205	100	Perfil H60	3
CP.2.H60	380	205	100	Perfil H60	3
CP.3.NSP	380	205	100	Sol. Prop.	4
CP.4.NSP	380	205	100	Sol. Prop.	4

5.2 - Condições de ensaio

O procedimento de ensaio laboratorial consiste em aplicar forças transversais ao provete, que têm como função simular o efeito das cargas aplicada

sobre a laje colaborante e força axial aos perfis UPN, aos quais as chapas perfiladas foram fixas (Figura 87)(Figura 86). Esta força axial irá provocar rotura do provete por escorregamento ao longo da interface aço betão, fenómeno equivalente ao verificado em lajes colaborantes com colapso induzido por corte longitudinal(Figura 87)(Figura 86).

A carga transversal será aplicada por tirantes formados por varão roscado de diâmetro 12mm de classe 8.8 que serão aparafusados a perfis de secção UPN 80 que cintam os provetes. Os tirantes serão pré-esforçados, de forma a simular a carga vertical aplicada sobre a laje.

A carga vertical, axial aos perfis UPN 120, será aplicada através de um macaco hidráulico. Assim, a carga transmitida a cada chapa perfilada será metade da carga total do macaco e em cada alma será resistido a um quarto da carga total.

Ao longo do ensaio, será recolhida informação a cada segundo, detalhando a carga instantânea transmitida pelo macaco hidráulico, a deformação da estrutura de reação e o escorregamento aço-betão em relação à posição inicial, para tal serão utilizados dispositivos de recolha e aquisição de dados.

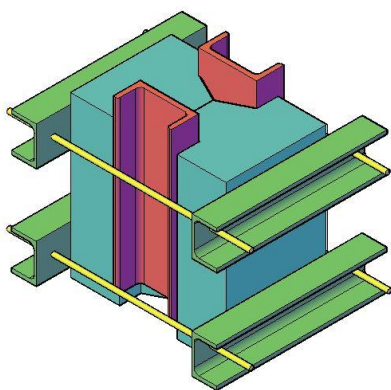


Figura 87 - Imagem tridimensional - vista superior

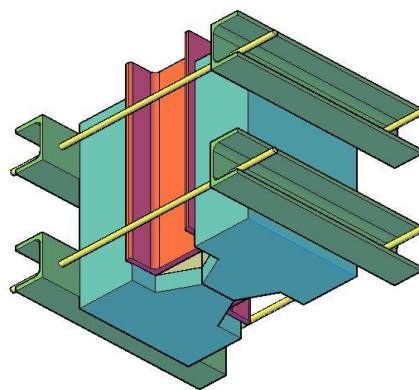


Figura 86 - Imagem tridimensional - vista inferior

5.3 - Preparação dos ensaios laboratoriais

Nesta fase irá recorrer-se dos equipamentos e estruturas disponíveis no laboratório de estruturas, assim os corpos de prova foram transportados para o referido local, onde foram descofrados (Figura 89) e foi removida a chapa de cofragem que havia sido soldada ao provete (Figura 88). Após esta breve preparação os corpos de prova, encontram-se prontos para a realização do ensaio (Figura 90).



Figura 90 - Corpo de prova pronto para ensaio



Figura 89 - Descofragem de corpos de prova



Figura 88 - Remoção de chapa de cofragem

Estudaram-se as estruturas existentes, de forma conceber uma montagem laboratorial que permitisse aplicar a força necessária para levar os corpos de prova à rotura. A estrutura selecionada trata-se de uma estrutura tridimensional, constituída por dois pórticos e vigas transversais que os ligam. Os pórticos são formados por pilares metálicos da série HEB 300 e vigas da série HEB 500, que suportam as vigas transversais com secção HEB 800. As ligações pilar viga são formadas por 8 parafusos M27.

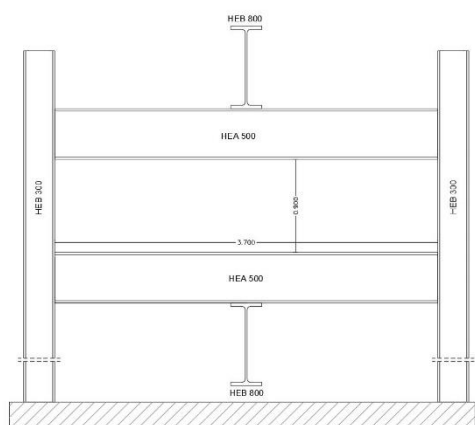


Figura 91 - Esquema da estrutura selecionada



Figura 92 - Fotografia da estrutura selecionada

Baseado no pré-esforço a aplicar aos tirantes, a carga expectável de rotura para os provetes é 120 kN, para os CP.1.H60 e CP.2.H60, ao passo que nos CP.3.NSP e CP.4.NSP é 380 kN. Assim, a estrutura de reação foi analisada tendo em conta, não só a carga máxima espectável de rotura, mas também a distância ao apoio a que o ensaio se vai realizar. Com estas condições de ensaio, verifica-se que as vigas HEB 500 têm capacidade de resistir a momento fletor de intensidade 9,28MNm, contudo as vigas transversais transmitem-lhes carga, minorando a capacidade resistente global de resistir a momentos fletores para 8,50MNm.

A primeira montagem laboratorial será realizada com um macaco hidráulico de 250 kN que produz um momento fletor de 141 kNm. Na segunda montagem, foram utilizados dois macacos hidráulicos planos (flat jacks) com carga máxima de 500 kN que geram 282 kNm de flexão na estrutura de reação, ambas inferiores à capacidade resistente da estrutura. O recurso a dois macacos planos justifica-se com a necessidade de um curso de aproximadamente 3 cm, visto que cada tem 1,5 cm de curso, que é insuficiente para vencer as folgas da montagem laboratorial e levar o corpo de prova à rotura.

Quanto às ligações metálicas, foi verificada a resistência ao corte e à flexão, garantindo segurança do ensaio.

5.4 - Primeira fase de ensaios laboratoriais

5.4.1 - Montagem laboratorial

A montagem de todos os componentes será executada de forma sequencial. Inicialmente aplicam-se os tirantes, montados com os perfis UPN 80, e pré-esforçam-se a 42 Nm na primeira fase e 10 Nm, que se traduz em 18 kN e 6 kN, respetivamente, de esforço axial, segundo a calibração apresentada no subcapítulo Anexo 1 - Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio. Concluída a preparação do corpo de prova, apoia-se sobre a viga inferior do pórtico descrito no subcapítulo 5.3 - Preparação dos ensaios laboratoriais, e coloca-se, sobre os perfis UPN120, uma chapa de aço com dimensões 300x250x25mm que tem como função transmitir carga axial, gerada pelo macaco hidráulico, aos perfis UPN120. Posteriormente calibra-se a célula de carga e instala-se sobre a chapa anterior. Por fim, coloca-se uma chapa metálica de dimensões 100x100x5mm entre a célula de carga e o macaco hidráulico, que já se encontrava instalado no pórtico de ensaio, a qual tem como função assegurar a que a leitura fornecida corresponde à totalidade da ação produzida.

Concluída a instalação sequencial de todos os elementos a instalar segundo o eixo de ensaio, colocam-se dois transdutores de deslocamentos, que permitem a leitura instantânea de deslocamentos relativos entre um ponto fixo e a parte metálica do corpo de prova. De forma a minimizar o erro medido pelos referidos equipamentos é instalado mais um par de transdutores sob o banzo da viga HEB 500. No subcapítulo Anexo 2 - Montagem laboratorial - primeira fase de ensaios apresentam-se os desenhos da montagem laboratorial (Figura 93).

Para aquisição e registo de dados fornecidos pelos transdutores de deslocamentos e pela célula de carga recorreu-se a um equipamento de aquisição de dados (datalogger) com capacidade de registar informações em intervalos de tempo constantes.



Figura 93 - Montagem Laboratorial - primeira fase de ensaios

5.4.2 - Procedimento experimental

A realização do trabalho experimental inicia-se verificando que todos os equipamentos de aquisição de informação estão devidamente calibrados e que o registo de informação está a ser executado de forma correta. Posteriormente, introduz-se alguma carga no sistema de forma eliminar folgas entre os componentes da montagem até se verificar um pequeno aumento de carga, cerca de 1kN, registado pela célula de carga.

Com todas as verificações efetuadas, inicia-se o ensaio experimental programando o Datalogger de forma a registar toda a informação fornecida por cada equipamento em intervalos de tempo de um segundo e inicia-se o incremento de carga no corpo de prova aumentando a pressão do óleo no sistema, com o auxílio de uma bomba hidráulica. O incremento de carga estabelecido foi 5kN, sendo que o próximo aumento é feito apenas quando os registos do Datalogger são estáveis.

No final do ensaio laboratorial a informação registada pelo Datalogger é recolhida e transferida para um software de tratamento de dados.

5.4.3 - Realização dos ensaios

O primeiro corpo de prova a ensaiar foi o ref. CP.1.H60, caracterizado por ter bossas com a configuração da chapa perfilada H60. O incremento de carga foi efetuado conforme descrito no subcapítulo 5.4.2 - Procedimento experimental.

Até à carga de 50 kN não se verificaram manifestações. Para a carga de 50kN, ouviram-se alguns sons característicos da cedência do material e apareceu a primeira fissura vertical na ligação do betão à chapa perfilada ao longo das superfícies de contacto e apresenta abertura igual ao longo de todo o desenvolvimento (Figura 94).

Com o continuo incremento de carga transmitida ao corpo de prova, a cedência dos materiais é mais audível e as fissuras tendem a aumentar a abertura, acompanhando estas manifestações o deslocamento relativo entre os materiais também aumenta.

Durante o incremento da força axial até 120 kN, a cedência dos materiais tornou-se mais audível e a cada incremento de carga verifica-se aumento do deslocamento relativo entre o aço e o betão.

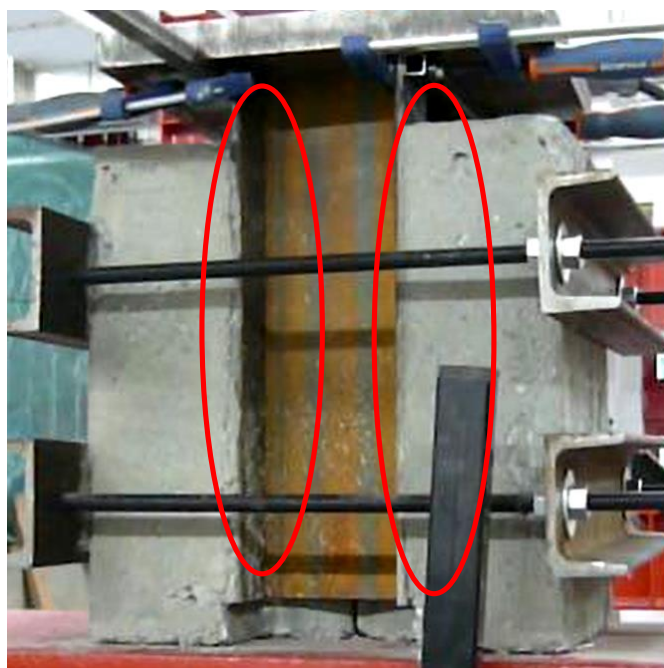


Figura 94 - Primeira fissura (50 kN $\delta=0,12\text{mm}$) - CP.1.H60

À carga de 128 kN o corpo de prova atinge a capacidade máxima, havendo libertação de fragmentos de betão e a fissura vertical entre os materiais apresenta aproximadamente 2mm de abertura (Figura 95).

Após a rotura do provete, o aumento da pressão no sistema hidráulico do macaco não conduziu a aumento de carga no provete, mas incrementou o

deslocamento relativo entre os materiais, denunciado a rotura da ligação aço betão.

Durante a realização do trabalho laboratorial foram registados: a deformação da estrutura de reação ao ensaio descrita no subcapítulo 5.3 - Preparação dos ensaios laboratoriais, o deslocamento relativo no corpo de prova e a força axial transmitida ao provete. Todos estes parâmetros foram recolhidos por um equipamento digital de aquisição de dados, programado para registar todos dados em intervalos de tempo constantes de um segundo.

Paralelamente à informação técnica recolhida do ensaio, realizaram-se vídeos e captaram-se fotografias que são apresentadas no Anexo 3 - Registo fotográfico - primeira fase de ensaios.

Apresenta-se também, no subcapítulo Anexo 4 - Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios, a informação recolhida do ensaio laboratorial.

Em seguida testou-se o corpo de prova CP.2.H60 com as mesmas condições e procedimentos experimentais do CP.1.H60.

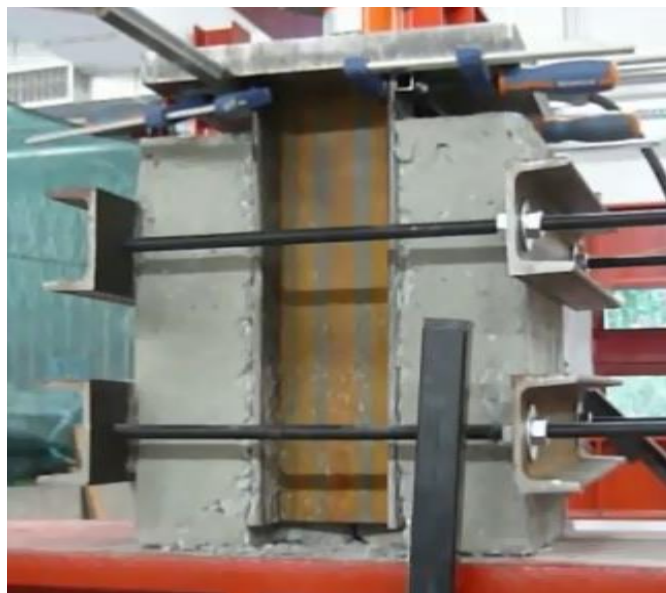


Figura 95 - Corpo de prova após rotura (128 kN $\delta=11,86\text{mm}$) - CP.1.H60

Este provete manifestou a primeira fissura para a carga de 60 kN. A partir desta carga foi audível a cedência do corpo de prova. Contudo a carga teve comportamento crescente até aos 130 kN, acompanhando o incremento da carga,

aumentou o deslocamento relativo. Após atingido este nível de carga, aumentando a pressão hidráulica no macaco verificou-se diminuição na carga transferida ao corpo de prova e aumento do deslocamento relativo entre os materiais.

As informações recolhidas neste ensaio laboratorial apresentam-se nos anexos referidos anteriormente.

Restando ainda dois corpos de prova o CP.3.NSP e o CP.4.NSP, deu-se continuidade ao procedimento experimental.

No teste do provete CP.3.NSP, realizou-se o mesmo procedimento experimental que nos anteriores, contudo a carga máxima alcançada foi 186.29 kN para um deslocamento relativo (δ) de 0,58mm. Neste nível de carga, a pressão instalada no sistema hidráulico atingiu 600 bar, sendo esta a pressão máxima admissível pela bomba de óleo utilizada. Desta forma, a montagem laboratorial mostrou-se insuficiente para levar os restantes corpos de prova à rotura e deu-se por concluída a primeira fase de ensaios laboratoriais.

Após o ensaio experimental dos corpos de prova realizou-se o teste de três cubos de betão (150x150x150mm) para caracterizar a resistência do betão com a mesma idade que a dos corpos de prova. Como resultados concluiu-se que a idade de 28 dias o betão apresentava 39 MPa de resistência à compressão.

5.4.4 - Análise de dados recolhidos

Após a realização dos ensaios laboratoriais os corpos de prova que atingiram a rotura foram desmontados, separando a parte metálica dos blocos de betão. Todo o procedimento foi registado fotograficamente e apresenta-se no subcapítulo Anexo 3 - Registo fotográfico - primeira fase de ensaios. Verificou-se



Figura 96 - Interface no betão - CP.1.H60 após rotura



Figura 97 - Interface no aço - CP.1.H60 após rotura



Figura 98 - Vista superior -CP.1.H60 após rotura

esmagado do betão na zona das bossas da chapa perfilada, com maior expressão nas bossas superiores do corpo de prova, e observaram-se vestígios de esmagamento do betão na zona das “rolhas” de solda de ligação entre a chapa perfilada e os perfis UNP Figura 98) (Figura 97). A chapa perfilada não apresenta deformações plásticas visíveis a quando do desmonte do corpo de prova (Figura 96).

O corpo de prova CP.1.H60 apresentou a primeira fissura à carga de 47,65 kN com deslocamento relativo entre o aço e o betão de 0,11 mm e esforço axial nos tirantes de 18 kN. Nesta fase do ensaio é quebrada a aderência química entre os materiais aço e betão. Quanto ao CP.2.H60 as mesmas manifestações verificaram-se à carga de 47,65 kN com deslocamento relativo entre os materiais de 0,47mm e 18 kN de esforço axial no tirante.

A partir desta carga de ensaio, o esforço axial no provete, que simula o corte longitudinal em lajes, é resistido exclusivamente pelas bossas das chapas perfiladas.

A rotura do provete CP.1.H60 verificou-se à carga de 128,37 kN com um deslocamento relativo entre os materiais de 11,86 mm e esforço axial no tirante de 18 kN. Quanto ao CP.2.H60 a carga de rotura foi 130,25 kN para um deslocamento relativo de 10,07 mm e o mesmo esforço axial nos tirantes do CP.1.H60. Apresenta-se em seguida o gráfico da relação força axial - deslocamento relativo entre os materiais.

Observando o betão, é perceptível que o esmagamento do betão se deu ao da superfície de contacto entre as bossas da chapa perfilada e o betão. Contudo é nas extremidades, superior e inferior, da bossa que se deteta manifestação



Figura 99 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.2.H60

intensa do fenómeno (Figura 99), o qual havia sido descrito por Daniels, B. J., Crisinel, M.[15]. Assim, o trabalho experimental confirma os resultados obtidos de modelos analíticos pelos autores referidos.

Analisando a tensão instalada em cada bossa dos CP.1.H60 e CP.2.H60, considerando que apenas 1cm superior e 1cm inferior de cada bossa têm contribuição significativa para a resistência global da solução construtiva, verifica-se uma tensão máxima instalada de 45,17 MPa superior à tensão característica do betão à idade do ensaio (28 dias) de 39 MPa, compatível com o fenómeno observado.

A chapa perfilada não apresenta qualquer deformação plástica desenvolvida pelo ensaio, nem na geometria da secção nem na configuração das bossas. Contudo, verificam-se vestígios de fricção entre as extremidades das bossas e betão, não se verificando na zona central das bossas (Figura 100).



Figura 100 - Esmagamento do betão na interface (aço) - CP.2.H60

5.5 - Segunda fase de ensaios laboratoriais

5.5.1 - Montagem laboratorial

Seguindo o mesmo procedimento da primeira fase de ensaios, a montagem de todos os componentes será executada de forma sequencial. Inicialmente aplicam-se os tirantes, montados com os perfis UPN 80, e pré-esforçam-se a 10 Nm, que se traduz em 6 kN de esforço axial, segundo a calibração apresentada no subcapítulo Anexo 1 - Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio. Após a preparação do corpo de prova, marca-se o eixo do ensaio no local e recorre-se a paralelepípedos de granito com dimensões 100x100x200mm e a uma

chapa de aço com dimensões 400x400x28 para diminuir a altura útil do pórtico de reação, tendo em conta que os macacos de carga a utilizar têm 1,5cm de curso útil. Vencidos 22,8 cm de altura útil, o provete é colocado sobre a chapa metálica e centrado em relação ao eixo do ensaio. Posteriormente, sobre os perfis UPN120, é colocada uma chapa de aço com dimensões 300x250x25mm que tem como função transmitir carga axial, gerada pelo macaco hidráulico, à parte metálica do corpo de prova. Calibra-se a célula de carga e instala-se sobre a chapa anterior. Por fim, coloca-se uma chapa metálica de dimensões 195x155x10mm entre a célula de carga e o primeiro macaco hidráulico. Consecutivamente coloca-se outra chapa de aço de dimensões 200x145x10 e instala-se o último macaco hidráulico. Verifica-se se todos os componentes estão devidamente alinhados e colocam-se chapas de dimensões 100x100x10mm e 100x100x5mm de forma a colmatar a folgas entre o macaco superior e a viga de reação.

Concluída a instalação sequencial de todos os elementos a instalar segundo o eixo de ensaio (Figura 101), colocam-se dois transdutores de deslocamentos, que permitem a leitura instantânea de deslocamentos relativos entre um ponto fixo e a parte metálica do corpo de prova. De forma a minimizar o erro medido pelos referidos equipamentos é instalado mais um par de transdutores sob os banzos das vigas HEB 500. Para obter mais informação, dos ensaios laboratoriais, foram instalados dois extensómetros nos tirantes inferiores dos corpos de prova de forma a avaliar o incremento de carga axial no decorrer dos ensaios. No subcapítulo Anexo 5 - Montagem laboratorial - segunda fase de ensaios apresentam-se os desenhos da montagem laboratorial.

Para aquisição e registo de dados fornecidos pelos transdutores de deslocamentos, pela célula de carga e pelos extensómetros recorreu-se ao mesmo equipamento de aquisição de dados (datalogger) utilizado na primeira fase de ensaios.



Figura 101 - Montagem Laboratorial - segunda fase de ensaios

5.5.1 - Procedimento experimental

O procedimento experimental desta fase de ensaios é em tudo idêntico à primeira fase. Inicia-se verificando que todos os equipamentos de aquisição de informação estão devidamente calibrados e que o registo de informação está a ser executado de forma correta. Posteriormente, introduz-se alguma carga no sistema de forma a eliminar folgas entre os componentes da montagem até se verificar um pequeno aumento de carga, cerca de 1kN, registado pela célula de carga.

Com todas as verificações efetuadas, inicia-se o ensaio experimental programando o Datalogger de forma a registar toda a informação fornecida por cada a equipamento em intervalos de tempo de um segundo e inicia-se o incremento de carga no corpo de prova aumentando a pressão do óleo no sistema de forma alternada entre os dois macacos, com o auxílio de duas bombas hidráulicas. O incremento de carga estabelecido foi 20 kN, sendo que o próximo aumento é efetuado apenas quando os registos são estáveis.

No final do ensaio laboratorial, a informação registada pelo Datalogger é recolhida e transferida para um software de tratamento de dados.

5.5.2 - Realização dos ensaios

O primeiro corpo de prova a ensaiar foi o ref. CP.3.NSP, caracterizado por ter bossas com a configuração proposta pelo subcapítulo4.7- Proposta de nova

solução. O incremento de carga foi efetuado conforme descrito no subcapítulo 5.5.1 - Procedimento experimental.

Até à carga de 50 kN não se verificaram manifestações. Para a carga de 50kN, verificou-se um deslocamento relativo (δ) entre o aço e o betão de 1,18 mm. Este corpo de prova foi submetido a ciclos de carga que provocaram deformação residual entre os materiais, tendo-se ouvido a este nível de carga alguns sons característicos da cedência do material, mas não se verificaram novas fissuras, pois o provete já havia sofrido de fissuração na ligação dos materiais em ciclos de carga prévios (Figura 102).



Figura 102 - Primeira fissura (50 kN $\delta=1,18\text{mm}$) - CP.3.NSP

Com o contínuo incremento de carga transmitida ao corpo de prova, a cedência dos materiais é audível e as fissuras tendem a aumentar a abertura, acompanhando estas manifestações o deslocamento relativo entre os materiais, que também aumenta.

Durante o incremento da força axial até 350 kN, a cedência dos materiais tornou-se mais audível e a cada incremento de carga verifica-se incremento do deslocamento relativo entre o aço e o betão.

À carga de 372 kN o corpo de prova atinge a capacidade máxima, havendo libertação de fragmentos de betão e a fissura vertical entre os materiais apresenta aproximadamente 2mm de abertura (Figura 103).

Após a rotura do provete, o aumento da pressão no sistema hidráulico do macaco não conduziu a aumento de carga no provete, mas aumentou o deslocamento relativo entre os materiais, denunciado a rotura da ligação aço betão.

Durante a realização do trabalho laboratorial foram registados: a deformação da estrutura de reação ao ensaio descrita no subcapítulo 5.3 - Preparação dos ensaios laboratoriais, o deslocamento relativo no corpo de prova e a força axial transmitida ao provete. Todos estes parâmetros foram recolhidos por um equipamento digital de aquisição de dados, programado para registar todos os dados em intervalos de tempo constantes de um segundo.



Figura 103 - Corpo de prova após rotura (372 kN $\delta=5,85\text{mm}$) - CP.3.NSP

Paralelamente à informação técnica recolhida durante o ensaio, realizaram-se vídeos e captaram-se fotografias que serão apresentadas no Anexo 6 - Registo fotográfico - segunda fase de ensaios. Apresenta-se também, no Anexo 7 - Informação técnica recolhida - segunda fase de ensaios, a informação recolhida do ensaio laboratorial.

Em seguida, testou-se o corpo de prova CP.4.NSP com as mesmas condições e procedimentos experimentais do CP.3.NSP.

Este provete manifestou a primeira fissura para a carga de 65,6 kN. A partir desta carga foi, audível a cedência do corpo de prova, contudo a carga manteve atitude crescente até aos 392,49 kN, sendo esta a carga máxima e o deslocamento equivalente de 6,17 mm.

Analogamente ao CP.3.H60, após atingir a carga máxima o provete não tem capacidade de resistir a carga e para um incremento de pressão no sistema hidráulico, conduz apenas incremento no deslocamento relativo e redução na carga axial transferida ao provete.

As informações recolhidas neste ensaio laboratorial apresentam-se nos anexos referidos anteriormente.

Após o ensaio experimental dos corpos de prova realizou-se o teste de três cubos de betão (150x150x150mm) para caracterizar a resistência do betão com a mesma idade que a dos corpos de prova. Como resultados concluiu-se que a idade de 180 dias o betão apresentava 60 MPa de resistência à compressão

5.5.3 - Análise de dados recolhidos

Após a realização dos ensaios laboratoriais os corpos de prova que atingiram a rotura foram desmontados, separando a parte metálica dos blocos de betão. Todo o procedimento foi registado fotograficamente e apresenta-se no Anexo 6 - Registo fotográfico - segunda fase de ensaios. Verificou-se esmagado do betão na zona das bossas da chapa perfilada (Figura 104)(Figura 105) e vestígios de esmagamento do betão na zona das “rolhas” de solda de ligação entre a chapa perfilada e os perfis UNP. A chapa perfilada apresenta deformações plásticas (Figura 106).



Figura 104 - Interface no betão - CP.3.NSP após rotura



Figura 105 - Interface no aço - CP.3.NSP após rotura



Figura 106 - Vista superior - CP.3.NSP após rotura

O corpo de prova CP.3.NSP manifestou os primeiros ruídos característicos da fissuração do betão à carga de 46,72 kN. A este nível de carga, verificava-se um deslocamento relativo entre o aço e o betão de 1,21 mm e o esforço axial nos tirantes era 6,59 kN. Nesta fase do ensaio, não se verificaram novas fissuras visto que o corpo de prova tinha sofrido ciclos de carga que não o levaram à rotura mas quebraram a aderência química entre os materiais e à manifestação da fissura ao longo da interface aço betão como se observou na Figura 102. A carga máxima transmitida foi 372,79 kN, apresentando o provete neste instante um deslocamento relativo entre o aço e o betão de 5,85 mm e os tirantes inferiores eram solicitados com 11,88 kN. Após atingir este nível de carga, qualquer incremento de pressão no sistema hidráulico do macaco conduziu ao aumento do deslocamento relativo aço-betão e decréscimo na carga axial transmitida ao corpo de prova.

No ensaio experimental do CP.4.NSP, a primeira fissura verificou-se à carga de 65,60 kN com deslocamento relativo entre os materiais de 1,1,3mm e 6,86 kN de esforço axial no tirante. Após a primeira fissura surgiram ruídos característicos da fissuração do betão com intensidade crescente acompanhando o incremento de carga axial no corpo de prova. Ao atingir a carga axial de 392,49 kN ouve-se um ruído forte e há libertação de fragmentos de betão. Esta foi a carga de rotura do provete, tendo-se verificado a este nível de carga 6,17 mm de deslocamento relativo entre os materiais e 11,36 kN de esforço axial nos tirantes inferiores.



Figura 107 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.4.NSP

Analisando o remanescente dos corpos de prova CP.3.NSP e CP.4.NSP, observa-se que as almas da chapa perfilada se encontram fletidas. No corpo de

betão há indícios de esmagamento de betão nas zonas das bossas construída e na zona lisa, sem bossas, o betão encontra-se intacto (Figura 107).

Analisando a tensão instalada em cada bossa dos CP.3.NSP e CP.4.NSP, considerando que apenas 1 lado do “V” e a parte reta da bossa inferior têm contribuição significativa para a resistência global da solução construtiva, face às condições de ensaio, verifica-se uma tensão máxima instalada de 68,14 MPa superior à tensão característica do betão à idade do ensaio (180 dias) de 60 MPa, compatível com o fenómeno observado.

A chapa perfilada apresenta deformações plásticas ao longo das almas. Entre as bossas inferiores encontram-se fragmentos de betão encravados entre as bossas retas, enquanto que na linha superior de bossa há vestígios de betão no interior e entre os “V”.



Figura 108 - Esmagamento do betão na interface (aço) - CP.4.NSP

5.6 - Métodos de rotura dos corpos de prova

Nas condições de ensaio, os corpos de prova colapsaram pela interface aço-betão. Na análise do fenómeno envolvido na rotura há que considerar as forças envolvidas no fenómeno e a resistência dos materiais. Assim, são apresentados os possíveis cenários que conduzem os corpos de prova à rotura:

1. *Esmagamento no betão* - O betão que se encontra moldado às bossas das chapas perfiladas sofrerá compressão e, caso a tensão instalada seja superior à tensão resistente de compressão do betão, este sofre esmagamento. Verificado este fenómeno o bloco de betão desgasta-se e a superfície de contacto entre os materiais é suavizada perdendo capacidade de transmitir esforços à bossa, visto que a superfície deixa de contactar com as bossas.

2. *Deformação plástica das bossas* - Neste cenário, a força que o betão transmite à bossa tem intensidade suficiente para deformar plasticamente a bossa, por flexão, compressão ou corte localizado na superfície de contacto aço-betão.

3. *Deformação da chapa perfilada* - Caso a componente horizontal do esforço que se encaminha para a chapa, através do efeito de cunha das bossas, que provoca flexão na alma da chapa seja superior à capacidade de resistência à flexão da alma da chapa, então a chapa deforma-se sofrendo rotação em torno do banzo inferior da chapa. Consequentemente a ligação mecânica do efeito de cunha das bossas é anulado, possibilitando o escorregamento dos materiais ao longo da interface.

4. *Deformação nos tirantes inferiores* - Ao longo do ensaio o referido tirante sofre aumento do esforço axial. Consequentemente, o nível de tensão instalada aumenta e, assim o tirante pode sofrer alongamento. Caso o alongamento seja superior a 6mm para o CP.1.H60 ou CP.2.H60 e 8mm para o CP.3.NSP ou CP.4.NSP. Os blocos de betão deslocam-se no sentido do alongamento do tirante e libertam-se das bossas, verificando-se, conseqüentemente, escorregamento entre os materiais.

5.7 - Análise da rotura dos corpos de prova

De forma a compreender o fenómeno envolvido no colapso dos corpos de prova propõe-se um modelo de escoras e tirante (Figura 109) que permite compreender as forças envolvidas no ensaio laboratorial. A força axial F produzida pelo macaco hidráulico é transmitida às duas chapas perfiladas através dos perfis metálicos UNP 120, a quais as chapas perfiladas se encontram soldadas. O esforço é transmitido aos blocos de betão através da interface aço betão, para tal solicitam-se as bossas para resistir ao esforço, que é equivalente ao corte longitudinal em lajes mistas. Para caracterizar a rotura dos corpos de prova tem-se em conta dois parâmetros: o ângulo formado pelas escoras de betão com os tirantes de aço (Θ) e o coeficiente de atrito (μ), traduzido pela relação entre a carga horizontal e a vertical.

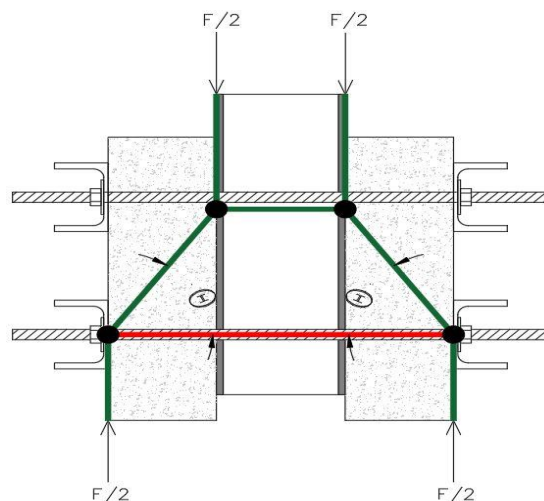


Figura 109- Modelo de escoras e tirantes do ensaio

Pelo subcapítulo 5.4.4 - Análise de dados recolhidos, referente à primeira fase de ensaios, os corpos de prova foram carregados com carga axial que teve atitude crescente sem manifestações aparentes, nos provetes, até à carga de 50 kN, neste nível de carga quebrou-se a aderência química entre o aço e o betão e a ligação mecânica passou a ser solicitada, na ligação aço-betão visível surgem as primeiras fissuras. Desta carga em diante foram audíveis ruídos de fissuração do betão, com intensidade crescente, acompanhando o incremento da carga de ensaio. À carga aproximada de 130 kN os blocos de betão escorregam ao longo da interface e deste ponto em diante a carga diminui enquanto que o deslocamento relativo entre os materiais aumenta. Durante a primeira fase de ensaios os tirantes não foram instrumentados, pelo que não foi possível medir a extensão destes. Contudo em um dos ciclos de carga do CP.3.NSP, foram medidas as extensões dos tirantes para os mesmos níveis de carga da primeira fase de ensaios. Assim a extensão dos tirantes foi extrapolada para a primeira fase de ensaios e quantificou-se o esfoço axial instalado nos tirantes para cada intervalo de tempo.

Na primeira fase de ensaios os tirantes sofreram extensões máximas de $40 \mu\epsilon$, com pouca expressão face pré-esforço aplicado de 18 kN. Na fase de tratamento de dados foram determinados os parâmetros indicados anteriormente, coeficiente de atrito e ângulo da escora de betão. Os resultados para cada intervalo de tempo apresentam-se no Anexo 4 - Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios. Há a referir que na rotura o CP.1.H60 e o

CP.2.H60 são caracterizados com coeficiente de atrito (μ) de 0,1 ângulo entre a escora de betão e o tirante de 60° e tensão tangencial 1,60 MPa.

Os provetes da primeira fase entraram em rotura por perda ligação entre o aço e o betão. Numa fase inicial do ensaio, após a rotura da aderência química aço-betão, o efeito das bossas foi acionado e revelaram-se eficientes no intervalo de carga dos 50 kN até a rotura. Para esta carga as componentes transversais das escoras de betão que transferem a solicitação entre o betão e a interface atingiram um esforço suficiente para fletir as almas das chapas perfiladas e deslocar os perfis para o exterior. Este deslocamento provocou o “desencaixe” das bossas no betão permitindo que os blocos de betão escorregassem ao longo da interface.

Após a realização do ensaio os corpos de prova foram desmontados, verificando-se que a deformação nas almas das chapas perfiladas fora em regime elástico, e o remanescente dos corpos de prova não apresenta deformações.

Observando o Anexo 3 - Registo fotográfico - primeira fase de ensaios, comprova-se que a interligação mecânica das bossas foi acionada pois, há vestígios de betão esmagado e nas bossas da chapa perfilada observam-se alguns “arranhões” típicos de fenómenos friccionais.

Pelo subcapítulo 5.5.3 - Análise de dados recolhidos, referente à segunda fase de ensaios, o corpo de prova CP.3.NSP havia sofrido alguns ciclos de carga que levaram à rotura da aderência química entre os materiais e provocaram a manifestação de fissuras na ligação aço-betão. O CP.4.NSP apresentou comportamento idêntico aos corpos de prova da primeira fase de ensaios com as mesmas manifestações na fase de carga até à rotura da aderência química aço-betão à carga de 65,6 kN. A partir desta carga ambos os corpos de prova, CP.3.NSP e CP.4.NSP apresentaram comportamentos idênticos e com as mesmas manifestações. Com o incremento de carga em escalões foram audíveis sons característicos da fissuração do betão e libertaram-se fragmentos de betão da zona de contacto dos materiais.

O CP.3.NSP atingiu a rotura à carga de 371,98 kN, nesta altura os blocos de betão escorregaram ao longo da interface, sem se verificar incremento na carga transmitida. Neste nível de carga os tirantes inferiores apresentavam uma extensão de $391,31 \mu\epsilon$ traduzindo 12,59 kN de esforço axial. Há a referir que na

rotura o CP.3.NSP caracteriza-se com coeficiente de atrito (μ) de 0,03, ângulo entre a escora de betão e o tirante de 82° e tensão tangencial 4,63 MPa.

No que respeita o CP.4.NSP, a carga de rotura verificada foi ligeiramente superior à do corpo de prova anterior, com 392,49 kN acompanhada de $345,75 \mu\epsilon$ de extensão nos tirantes inferiores e na rotura caracteriza-se por coeficiente de atrito (μ) de 0,03, ângulo entre a escora de betão e o tirante de 83° e tensão tangencial 4,89 MPa.

Nesta fase de ensaios a rotura dos corpos de prova deu-se por conjugação de dois fenómenos, por esmagamento do betão na zona das bossas e por deformação das almas das chapas perfiladas.

Após a rotura da aderência química, a interligação mecânica promovida pelas bossas propostas foi acionada, permitindo transmitir esforço entre os materiais até à carga média de 380 kN. Durante o incremento de carga libertaram-se fragmentos de betão em quantidade maior que na primeira fase de ensaios. Esta manifestação revelava ocorrência de micro-fissuração no interior dos corpos de betão, que terá sido provocada por esmagamento do betão na zona das “bossas” e forças de tração no núcleo de betão compreendido entre as almas. A referida tração é denunciada pela deformação plástica das almas das chapas perfiladas que serviu de reação.

O colapso deu-se por fissuração dos fragmentos de betão alojado entre as bossas, resultante da combinação de efeitos descritos anteriormente, que levou à anulação do efeito de cunha proporcionado pelas “bossas”. Conduzindo assim ao escorregamento entre os materiais.

Na Figura 110 apresenta-se o gráfico da relação entre o deslocamento relativo entre os materiais e a carga atuante / tensão tangencial.

A deformação inicial do CP.3.NSP, apresentada no referido gráfico deve-se aos ciclos de carga que sofreu antes da rotura, que permitiram avaliar as limitações dos equipamentos laboratoriais de forma a conseguir realizar o ensaio dos provetes. A deformação teve recuperação elástica devido aos tirantes aplicados ao provete. Quando em carga a força vertical desloca as bossas 1mm no sentido descende, sendo esta deformação do provete. Em fase de descarga a compressão transversal do provete volta a encaixar as bossas na posição original, recuperando a totalidade da deformação.

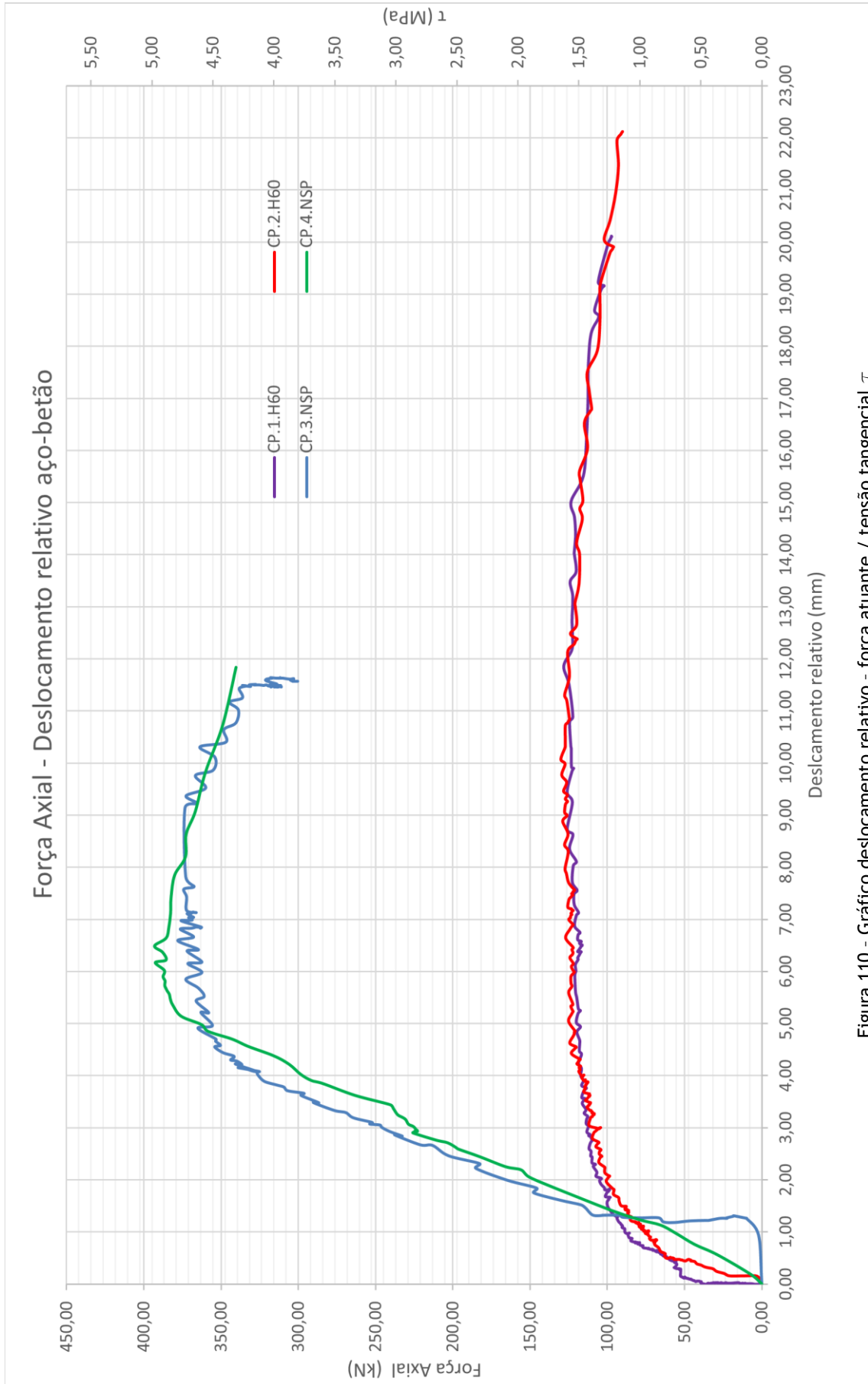


Figura 110 - Gráfico deslocamento relativo - força atuante / tensão tangencial τ

Capítulo 6 - Considerações finais

6.1- Principais conclusões

As lajes mistas de aço e betão têm especial interesse por constituírem um sistema construtivo em que a cofragem perdida contribui para a resistência estrutural do conjunto. A utilização desta solução construtiva é uma alternativa às soluções correntes na construção de lajes de edifícios.

Como objetivo principal deste trabalho pretendia-se caracterizar o comportamento mecânico do sistema construtivo, para o qual se desenvolveu uma metodologia baseada em modelos numéricos de elementos finitos (FEM) e de escoras e tirantes (STM). A investigação numérica culminou na proposta do modelo de escoras e tirantes que traduz o equilíbrio de forças gerado no interior das lajes mistas de aço e betão face a uma solicitação estática uniformemente distribuída sobre a superfície.

Na revisão bibliográfica, identificou-se que o modo de colapso mais usual deste tipo de lajes em utilizações comuns, é por corte longitudinal excessivo. Deste ponto em diante estudou-se o motivo de este ser o modo de colapso mais usual e concluiu-se que se deve à capacidade limitada da interface aço-betão transferir esforços entre eles. Para resistir ao corte longitudinal, as chapas perfiladas podem ser munidas de dispositivos que controlam o fenómeno, como por exemplo conectores tipo T-stud, deformações nas almas ou banzos executadas através de processo mecânicos de deformação a frio, como é o caso das secções trapezoidais, ou podem recorrer exclusivamente ao atrito aço-betão, apresentado uma interface friccional, como é o caso das secções reentrantes.

Baseado nas geometrias de chapas perfiladas existentes, ao longo do Capítulo 3 - Metodologia, planearam-se os estudos a desenvolver e a sequência deles, de forma a distinguir as diferenças entre os tipos de chapas perfiladas e caracterizar o equilíbrio de forças no interior da laje mista aço-betão. Foi proposto um modelo de escoras e tirantes concordante com as análises desenvolvidas.

Criaram-se modelos virtuais num software de cálculo automático que permitiu calcular o estado de tensão da estrutura pré-definida. O estudo das tensões, foi desenvolvido tendo por base a geometria trapezoidal, reentrante e retângular da chapa perfilada. Deste estudo concluiu-se que na secção trapezoidal

geram-se as tensões tangenciais com menor intensidade, enquanto que na solução reentrante verificam-se as tensões tangenciais superiores. No que respeita a secção retângular as referidas tensões geradas são ligeiramente superiores as proporcionadas pela secção trapezoidal. Sendo a secção trapezoidal tipicamente dotada de bossas para resistir a estes esforços e gerando o nível de tensões tangenciais menores é mais eficiente que a secção reentrante que gera o nível de tensões tangenciais mais elevado e depende da interface aço-betão para lhes resistir.

Analisando a tração na chapa perfilada verifica-se que a secção trapezoidal gera o maior nível de tensões e tem a menor área de aço para lhe resistir. Contrariamente a secção reentrante apresenta o menor nível de tensões e tem a maior área de aço para lhe resistir. Tendo em conta que este sistema construtivo é caracterizado por sofrer colapso ineficiente devido à rotura da conexão aço betão, o material aço não é solicitado na totalidade para resistir à flexão. Deste ponto de vista a secção reentrante é menos eficiente que a trapezoidal. Para utilizações não comuns, por exemplo, vãos curtos sujeitos a cargas pontuais elevadas, para os quais o modo de colapso não se dá por corte longitudinal, mas sim por flexão ou corte excessivo, a secção reentrante será mais eficiente pois a geometria da secção controla o fenómeno de separação vertical dos materiais e dispõe de maior área de aço para resistir à flexão.

Focando o estudo em lajes mistas com utilizações correntes, com colapso por corte longitudinal excessivo e secção trapezoidal, o estudo das tensões principais e os respetivos vetores permitiram identificar as direções principais de deformação do sistema construtivo e as respetivas intensidades das tensões. Este estudo permitiu orientar as bielas do modelo de escoras e tirantes segundo os referidos planos de tensão. À posteriori o STM foi idealizado, permitindo em paralelo caracterizar o caminho de forças na laje.

Na fase final da metodologia numérica verificou-se a compatibilidade entre os esforços atuantes no STM e no FEM. Com base neste modelo propôs-se uma nova configuração para as bossas da interface aço-betão.

Pela aplicação do modelo de escoras e tirantes observa-se que os banzos superior e inferior do corpo de betão se encontram em compressão, e apenas a chapa perfilada apresenta esforços de tração. Este fenómeno é contrário das

secções correntes em que o diagrama de tensão assume distribuição bi-triangular e deve-se à direção oposta das escoras espaciais que transmitem esforços entre o aço e betão.

Nesta fase da investigação dá-se por concluída a aplicação da metodologia numérica e inicia-se a aplicação da metodologia experimental. Contruíram-se corpos de prova tendo por base a geometria da chapa perfilada H60, fornecida pelo fabricante. Os provetes dividem-se em dois grupos, sendo o primeiro formado por dois corpos de prova contruídos com chapa perfilada com a solução H60, e o segundo formado por dois corpos de prova construídos com chapa perfilada de geometria iguala à solução H60, mas dotada de bossas dispostas de acordo com a proposta, resultante da metodologia analítica.

Na construção da parte metálica do segundo grupo de provetes não foi possível cunhar as bossas com o mesmo equipamento industrial da solução H60, pois seria necessário produzir uma matriz para o equipamento. Assim o relevo das bossas foi simulado através de varões de aço dispostos de acordo com a geometria proposta, soldados às almas das chapas perfiladas (lisas) e posteriormente foram rebarbados, conferindo um ângulo de 45° à faceta de cada bossa. Concluindo a construção dos provetes estes foram cofrados e betonado com betão C25/30.

Por fim os corpos de prova foram testados, recorrendo ao espaço e aos equipamentos laboratoriais da universidade. Os ensaios decorreram em duas fases, na primeira testaram-se os corpos de prova com a solução H60 e na segunda os provetes dotados das bossas propostas pela investigação.

Os primeiros dois corpos de prova atingiram a rotura com a carga média de 130 kN, acompanhada de um deslocamento médio relativo entre os materiais de 11mm e esforço axial nos tirantes inferiores estimado de 18,50 kN. Assim os parâmetros de comparação serão o coeficiente de atrito, μ , é 0,1, o ângulo entre a escora de betão e o tirante, θ , igual a 60° e a tensão tangencial na rotura, τ , de 1,60 MPa.

Os segundos dois corpos de prova atingiram a rotura com a carga média de 380 kN, acompanhada de um deslocamento médio relativo entre os materiais de 6,7 mm e esforço axial nos tirantes inferiores médio de 11,50 kN. Assim, os parâmetros de comparação para este grupo de provetes serão o coeficiente de

atrito, μ , é 0,03, o ângulo entre a escora de betão e o tirante, θ , igual a 82° e a tensão tangencial na rotura, τ , de 4,60 MPa.

Face aos resultados obtidos conclui-se que a solução proposta apresenta capacidade para resistir a esforços de corte longitudinais aproximadamente seis vezes mais elevados a solução H60. Contudo há a referir que a construção manual dos corpos de prova terá proporcionado este ganho elevado de resistência.

Concluindo, este trabalho experimental valida o ganho de resistência da solução proposta face à H60, mas será necessário desenvolver mais estudos para viabiliza-la.

6.2- Trabalhos Futuros

Para continuação deste trabalho de investigação, deveriam ser contruídos novos corpos de prova com chapas perfiladas munidas de bossas executadas enformadas a frio. Desta forma seria possível eliminar o fator construção manual que influência na resistência global do sistema construtivo. Caso este estudo se mostre viável poderão ser construídos corpos de prova à escala real e para realizar ensaios normalizados, como por exemplo o “m-K”.

Em paralelo deverá ser estudada a influência das condições de apoio na resistência, dado que foram detetadas alterações significativas nas tensões tangenciais na interface aço betão nas proximidades dos apoios.

Poderá ainda avaliar-se a influência da aplicação de conectores tipo T-stud sobre os apoios.

Bibliografia

- [1] EN 1991-1-1, “Eurocodigo 1: Acções em estruturas. Part 1-1: Acções Gerais.” Bruxelas: CEN - European committee for standardization, 2002
- [2] EN 1994-1-1, “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General Rules and rules for buildings.” Bruxelas: CEN - European committee for standardization, 2004
- [3] Porter, M. e Jr. Ekberg. “Design Recommendations for steel deck floor slabs.” *ASCE* (1976): 761-791.
- [4] Sputo, T. “Development of composite steel deck”, *Structure Magazine* (2012): 30-31
- [5] Calado, L. e Santos, J. “Estruturas Mistas de aço e betão”, 1ª edição. Lisboa: IST press, 2010: 3-105 e 345-432
- [6] An, Li e Cederwall, K. “Slip and separation at interface of composite slabs”, *Twelfth International Specialty Conference on Cold-formed steel structures* (1994): 385-397
- [7] Chen, S. e Shi, X. “Shear bond mechanism of composite slabs - A universal FE approach”, *Journal of constructional steel research* 67 (2011): 1475-1484
- [8] Lakshmikantham, K.N., Sivakumar, P., Ravichandran, R. e Jayachandran, S. A., “Investigations on efficiently interfaced steel concrete composite deck slabs” *Journal of Structures* (2013), Article ID 628759: 1-10
- [9] Leskelä, M. V. “Strength of composite slabs: comparison of basic parameters and their background”, *Rakenteiden Mekaniikka*, vol. 25 No 2 1992: 20-38
- [10] Chen, S., Shi, X. e Qui, Z. “Shear bond failure in composite slabs - a detailed study” *Steel and composite structures*, Vol 11 No 3 2011: 233-250
- [11] Crisinel, M., Ferrer, M., Marimon, F. e Verdes, M. “Influence of sheet surface conditions and concrete strength on longitudinal shear resistance of composite slabs”
- [12] Hedao, N. A., Gupta, L. M. e Ronghe, G. N. “Design of composite slabs with profile steel decking: comparison between experimental and analytical studies” *International Journal of Advanced Structural Engineering* (2012), 3:1
- [13] Chen, S. “Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints” *Journal of Constructional Steel Research* 59 (2003): 385-403

-
- [14] Daniels, B. J., Crisinel, M. “Composite slab behavior and strength analysis. Part I: Calculation Procedure” Journal of structural engineering, ASCE 119-1 (1993): 16-35
- [15] Daniels, B. J., Crisinel, M. “Composite slab behavior and strength analysis. Part II: Comparisons with test results and parametric analysis” Journal of structural engineering, ASCE 119-1 (1993): 36-49
- [16] ASCE Standard “Specifications for the design and construction of composite slabs” ASCE (1984) New York
- [17] Ferrer, M., Marimon, F., Crisinel, M. “Designing cold-formed steel sheets for composite slabs : An experimentally validated FEM approach to slip failure mechanics” Thin Walled Structures 44(2006): 1261 -1271
- [18] Abdullah, R., Easterling, W. S. “New evaluation and modeling procedure for horizontal shear bond in composite slabs” Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 891-899
- [19] Abdullah, R., Easterling, W. S. “Elemental bending test and modeling of shear bond in composite slabs”
- [20] Nash, W. “Resistência de materiais” 4ª edição. Alfragide, Mc Graw Hill 2001: 192-225
- [21] Dias da Silva, V. “Mecânica e resistência dos materiais” 1ª edição. Coimbra, Ediliber editora 1995 :85-99 e 217-234
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Friction#Coefficient_of_friction (Online) acedido a: 20/03/2015
- [23] William, K.J., Warnke, E. P. “Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete” Seminar on: “Concrete structures subjected to triaxil stresses (1974)
- [24] Louro, S. Dissertação para obtenção do grau de Mestre: “Estudo da aderência aço-betão elementos estruturais de BA” Universidade de Aveiro 2011
- [25] Johnson, R. P.” Composite structures of steel and concrete - Volume I Beams, Slabs, Columns, and frames for buildings” 2ª edição
- [26] Schlaich, J., Schäfer, K. e Jennewein, M. “Toward a Consistent Design of structural concrete” pci Journal vol. 32 nº 3, Prestressed concrete institute (may/june 1987) : 74-150

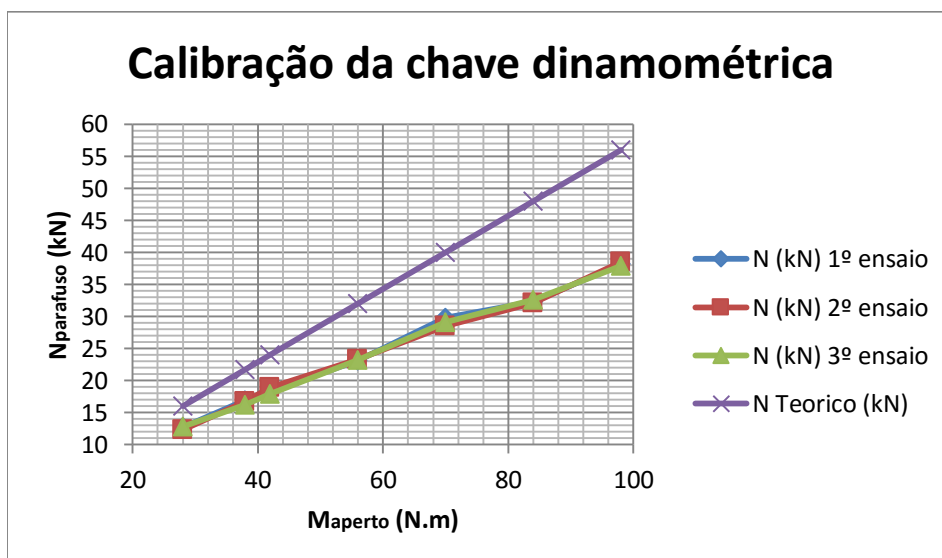
- [27] Schäfer, K. e Schlaich, J. “On the Consistent Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models” Conference on Analytical Models and New Concepts in Mechanics of Structural Concrete; Stuttgart, Germany 1993:104-144.
- [28] Zienkiewicz, O. C. “The Finite Element Method in engineering science” Mc Graw Hill 1971: 1-33, 90-103, 154-171
- [29] Zienkiewicz, O. C. “The finit element method” Mc Graw Hill 1977: 1-43, 226-267
- [30] ROBOT Structural Analysis Professional 2016, Versão académica, Autodesk
- [31] Ficha técnica da solução Haircol 59s, fabricante Arval, Arcelor Mittal
- [32] Ficha técnica da solução Cofraplus 60, fabricante Arval, Arcelor Mittal
- [33] Ficha técnica da solução Comflor 51, fabricante Corus
- [34] Ficha técnica da solução H60, fabricante O FELIZ

ANEXOS

Anexo 1 - Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio

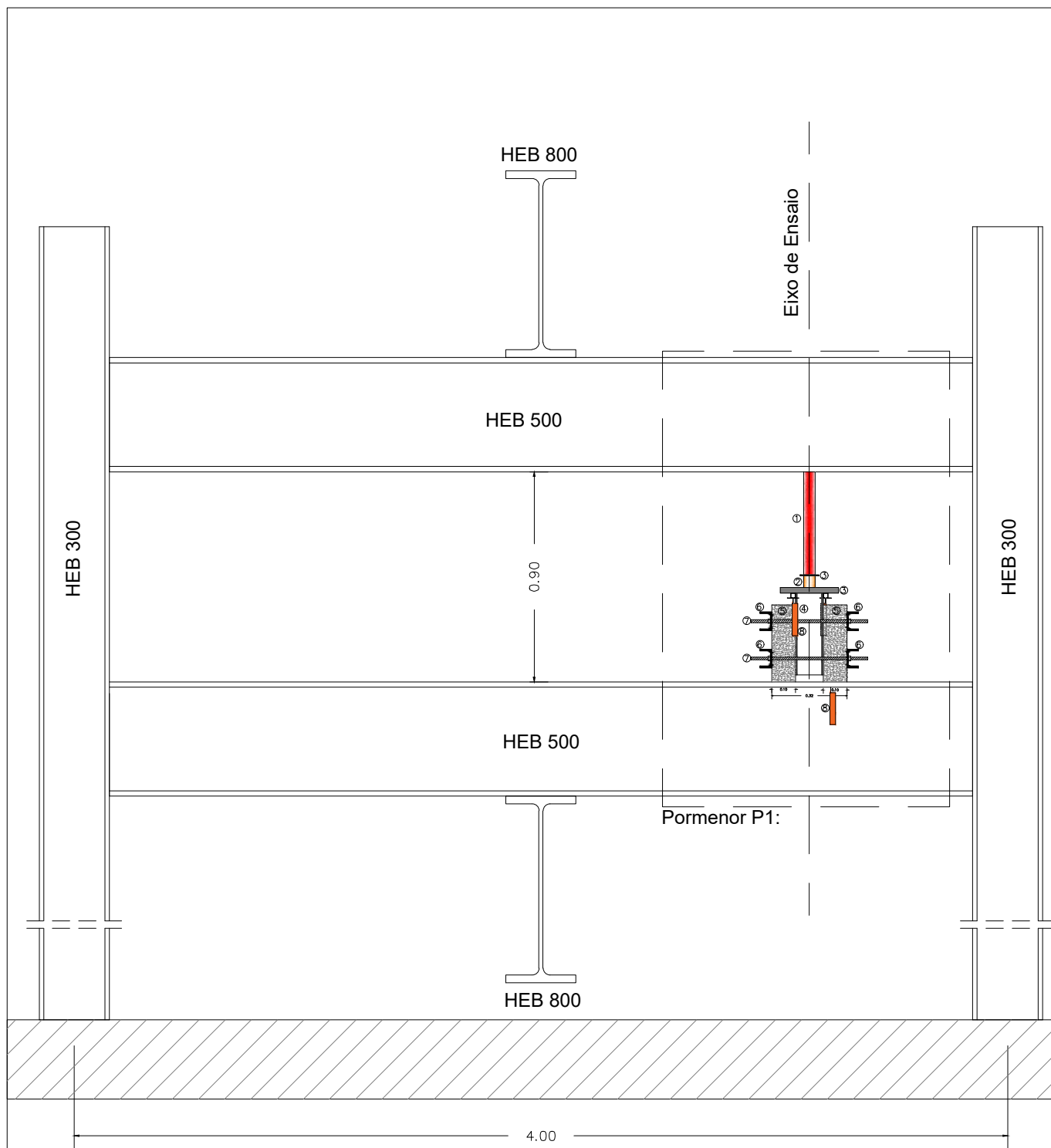
Maperto (N.m)	N (kN) 1º ensaio	N (kN) 2º ensaio	N (kN) 3º ensaio	N Teorico (kN)
28	12,77	12,34	12,87	16,0
38	16,97	16,74	16,21	21,7
42	18,35	18,97	17,91	24,0
56	23,1	23,37	23,21	32,0
70	29,8	28,54	29,15	40,0
84	32,31	32,11	32,58	48,0
98	38,2	38,54	37,86	56,0

$N_{\max}(8.8)M12: 47,55 \text{ kN}$
 $N(\text{kN})=0,3594 * \text{Map}$
Eq. Calibração: $(\text{Nm})+2,8946$



Calibração de pré-esforço

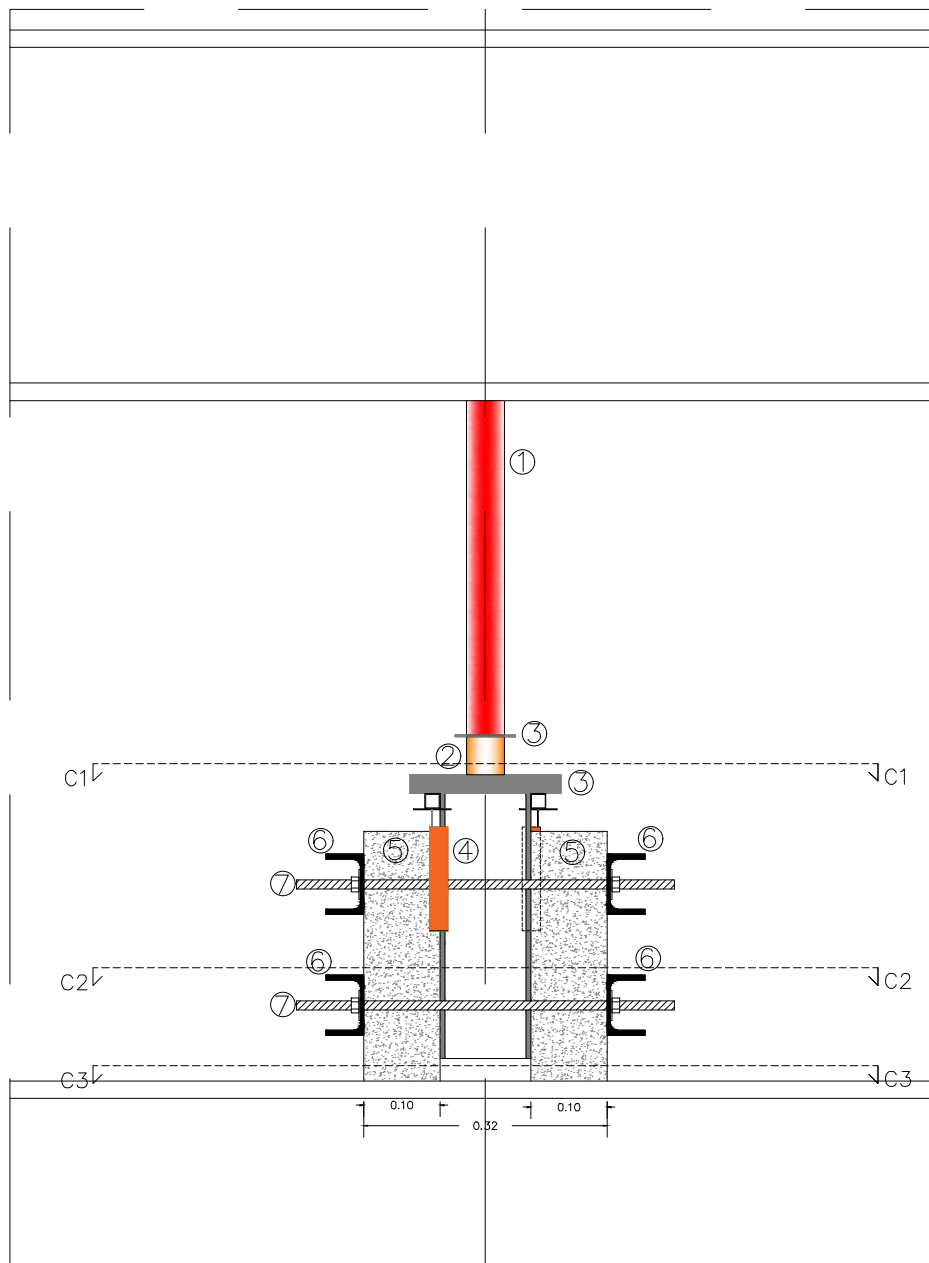
Anexo 2 - Montagem laboratorial - primeira fase de ensaios



- Legenda:
- 1-Macaco hidráulico
 - 2-Célula de carga
 - 3-Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)



UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: 1ª Fase de ensaios laboratoriais - Alçado da montagem laboratorial	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 01
	ESCALA: 1:25	REVISÃO Nº 00

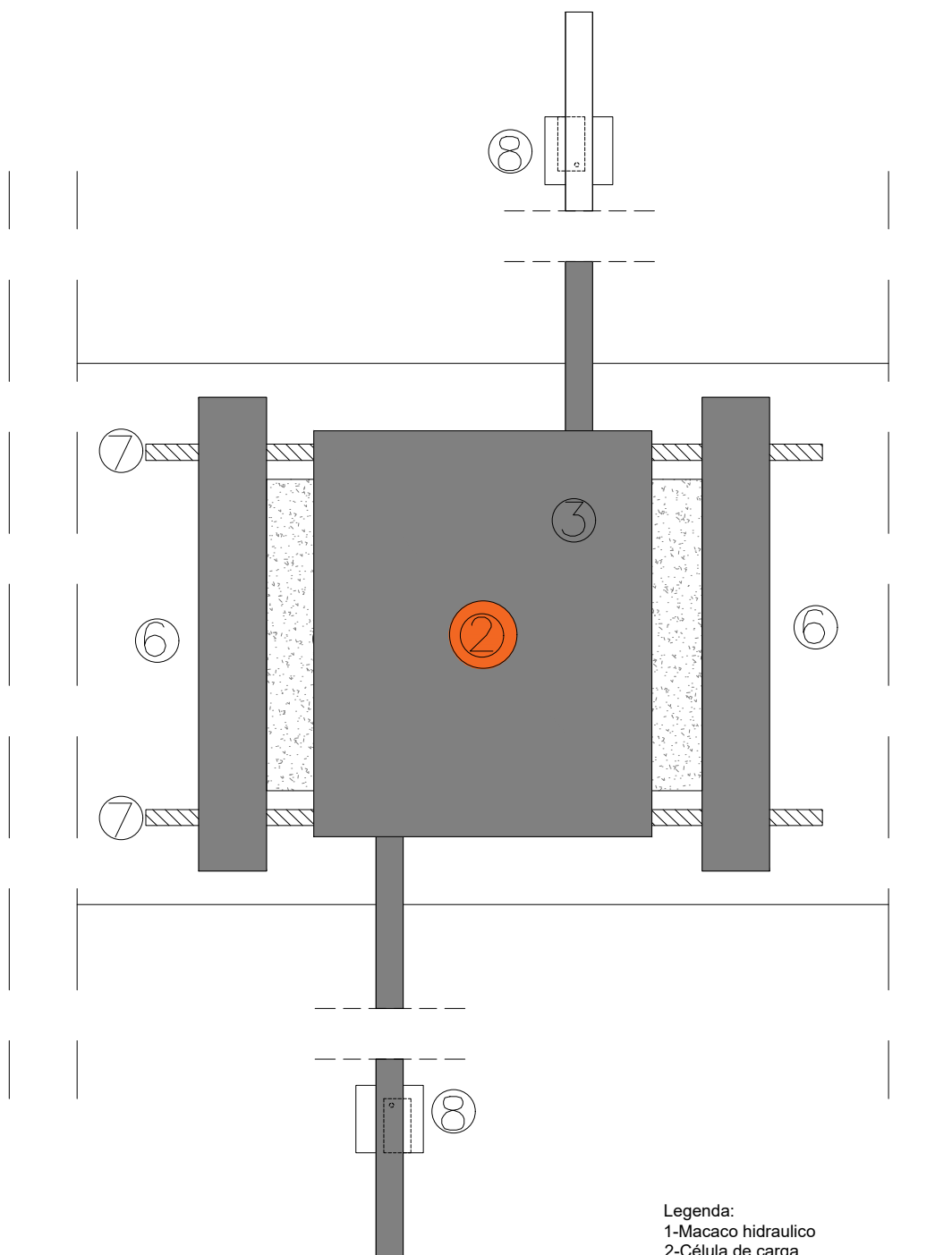


- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)

Pormenor P1:



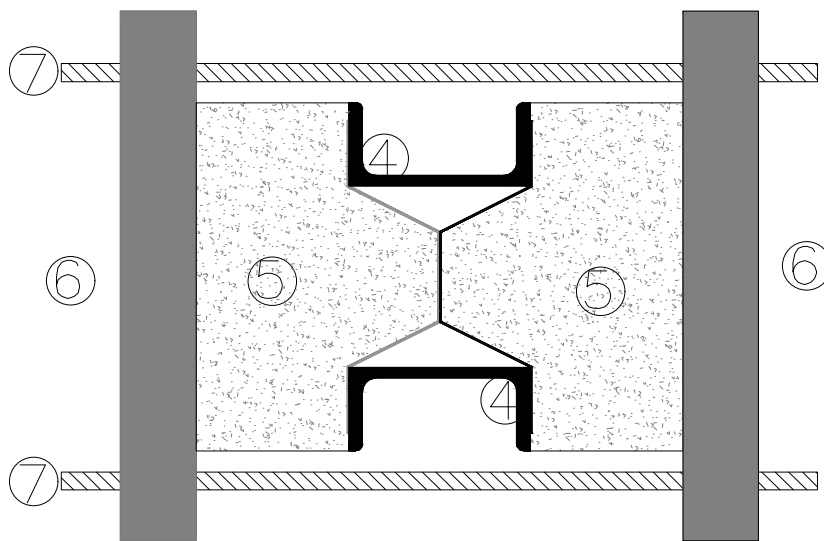
UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: Pormenor de montagem - P1	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 02
	ESCALA: 1:10	REVISÃO Nº 00



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)



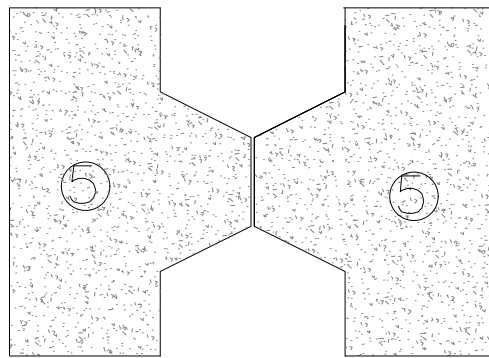
UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 1	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 03
	ESCALA: 1:5	REVISÃO Nº 00



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)



UBI- Universidade da Beira Interior	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº
DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil		04
TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface	ESCALA:	REVISÃO Nº
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 2	1:5	00



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)



UBI- Universidade da Beira Interior	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº
DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil		05
TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface	ESCALA:	REVISÃO Nº
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 3	1:5	00

Anexo 3 - Registo fotográfico - primeira fase de ensaios



Montagem Laboratorial



Montagem Laboratorial



Montagem Laboratorial



Corpo de prova CP.1.H60
após rotura



Corpo de prova CP.2.H60
após rotura



Parte metálica após rotura-
CP.1.H60



Desmonte do CP.1.H60 -
betão



Desmonte do CP.2.H60 -
betão



Esmagamento de betão nas
bossas – CP.1.H60

Anexo 4 - Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios

Corpo de prova CP.1.H60:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Ned (tirante) (kN)	μ	Θ (°)	T (Mpa)
0,00	0,00	17,99	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00
0,44	0,00	17,99	41,1	0	0,01
1,19	0,00	17,99	15,1	1	0,01
1,94	0,00	17,99	9,3	2	0,02
3,44	0,00	17,99	5,2	3	0,04
4,63	0,00	17,99	3,9	4	0,06
6,64	0,01	18,00	2,7	5	0,08
7,89	0,01	18,00	2,3	6	0,10
8,14	0,01	18,00	2,2	6	0,10
10,21	0,01	18,00	1,8	8	0,13
10,40	0,00	18,00	1,7	8	0,13
10,83	0,02	18,01	1,7	9	0,13
11,46	0,01	18,01	1,6	9	0,14
12,46	0,02	18,01	1,4	10	0,15
14,03	0,01	18,01	1,3	11	0,17
15,03	0,03	18,01	1,2	12	0,19
19,66	0,02	18,01	0,9	15	0,24
20,98	0,02	18,02	0,9	16	0,26
22,42	0,02	18,02	0,8	17	0,28
23,23	0,03	18,02	0,8	18	0,29
23,36	0,02	18,02	0,8	18	0,29
23,42	0,01	18,02	0,8	18	0,29
23,61	0,03	18,02	0,8	18	0,29
23,86	0,02	18,03	0,8	18	0,30
24,05	0,02	18,03	0,7	18	0,30
24,30	0,02	18,03	0,7	19	0,30
24,36	0,02	18,03	0,7	19	0,30
25,42	0,02	18,03	0,7	19	0,32
25,86	0,02	18,04	0,7	20	0,32
26,05	0,02	18,04	0,7	20	0,32
26,11	0,01	18,04	0,7	20	0,32
26,11	0,02	18,04	0,7	20	0,32
26,11	0,03	18,04	0,7	20	0,32
26,18	0,03	18,04	0,7	20	0,33
26,55	0,02	18,05	0,7	20	0,33
26,68	0,03	18,05	0,7	20	0,33
26,68	0,03	18,05	0,7	20	0,33
27,11	0,01	18,05	0,7	21	0,34
27,74	0,02	18,05	0,7	21	0,35

28,30	0,03	18,05	0,6	21	0,35
28,74	0,03	18,06	0,6	22	0,36
28,81	0,02	18,06	0,6	22	0,36
28,81	0,03	18,06	0,6	22	0,36
29,62	0,03	18,06	0,6	22	0,37
30,06	0,03	18,06	0,6	23	0,37
30,18	0,02	18,07	0,6	23	0,38
30,62	0,02	18,07	0,6	23	0,38
30,75	0,02	18,07	0,6	23	0,38
30,93	0,03	18,07	0,6	23	0,38
31,37	0,03	18,07	0,6	23	0,39
32,19	0,02	18,07	0,6	24	0,40
32,19	0,02	18,08	0,6	24	0,40
33,06	0,02	18,08	0,5	25	0,41
33,75	0,01	18,08	0,5	25	0,42
34,82	0,02	18,08	0,5	26	0,43
35,82	0,00	18,08	0,5	26	0,45
36,57	0,00	18,08	0,5	27	0,45
38,14	0,01	18,09	0,5	28	0,47
39,39	0,02	18,09	0,5	29	0,49
39,20	0,04	18,09	0,5	28	0,49
39,83	0,04	18,09	0,5	29	0,50
39,64	0,04	18,09	0,5	29	0,49
39,58	0,05	18,10	0,5	29	0,49
39,45	0,05	18,10	0,5	29	0,49
39,39	0,05	18,10	0,5	29	0,49
39,26	0,05	18,10	0,5	28	0,49
40,01	0,05	18,10	0,5	29	0,50
40,58	0,06	18,10	0,4	29	0,50
41,58	0,06	18,11	0,4	30	0,52
42,08	0,06	18,11	0,4	30	0,52
42,77	0,05	18,11	0,4	31	0,53
43,33	0,06	18,11	0,4	31	0,54
43,83	0,07	18,11	0,4	31	0,55
44,27	0,07	18,11	0,4	31	0,55
44,96	0,08	18,12	0,4	32	0,56
45,65	0,09	18,12	0,4	32	0,57
46,03	0,10	18,12	0,4	32	0,57
45,90	0,09	18,12	0,4	32	0,57
46,59	0,10	18,12	0,4	33	0,58
47,15	0,10	18,13	0,4	33	0,59
47,65	0,11	18,13	0,4	33	0,59
48,22	0,11	18,13	0,4	34	0,60
48,41	0,11	18,13	0,4	34	0,60
48,78	0,12	18,13	0,4	34	0,61

48,91	0,12	18,13	0,4	34	0,61
49,47	0,12	18,14	0,4	34	0,62
49,72	0,12	18,14	0,4	34	0,62
49,91	0,14	18,14	0,4	35	0,62
50,03	0,12	18,14	0,4	35	0,62
50,66	0,12	18,14	0,4	35	0,63
51,72	0,14	18,14	0,4	35	0,64
51,85	0,14	18,15	0,3	36	0,64
52,48	0,15	18,15	0,3	36	0,65
52,73	0,16	18,15	0,3	36	0,66
52,54	0,29	18,15	0,3	36	0,65
53,04	0,28	18,15	0,3	36	0,66
53,73	0,29	18,16	0,3	36	0,67
53,60	0,30	18,16	0,3	36	0,67
53,54	0,30	18,16	0,3	36	0,67
55,23	0,30	18,16	0,3	37	0,69
56,86	0,32	18,16	0,3	38	0,71
56,61	0,32	18,16	0,3	38	0,70
55,17	0,37	18,17	0,3	37	0,69
55,36	0,40	18,17	0,3	37	0,69
56,05	0,41	18,17	0,3	38	0,70
56,67	0,42	18,17	0,3	38	0,70
56,48	0,43	18,17	0,3	38	0,70
56,30	0,43	18,18	0,3	38	0,70
56,17	0,43	18,18	0,3	38	0,70
56,11	0,43	18,18	0,3	38	0,70
55,98	0,44	18,18	0,3	38	0,70
55,92	0,43	18,18	0,3	38	0,70
55,86	0,43	18,18	0,3	38	0,69
55,79	0,44	18,19	0,3	37	0,69
55,73	0,44	18,19	0,3	37	0,69
55,73	0,44	18,19	0,3	37	0,69
55,67	0,44	18,19	0,3	37	0,69
55,61	0,44	18,19	0,3	37	0,69
56,23	0,44	18,19	0,3	38	0,70
58,49	0,45	18,20	0,3	39	0,73
58,80	0,46	18,20	0,3	39	0,73
59,24	0,46	18,20	0,3	39	0,74
59,87	0,47	18,20	0,3	39	0,74
59,68	0,47	18,20	0,3	39	0,74
59,80	0,48	18,21	0,3	39	0,74
59,87	0,48	18,21	0,3	39	0,74
60,68	0,49	18,21	0,3	40	0,75
60,55	0,49	18,21	0,3	40	0,75
60,43	0,49	18,21	0,3	40	0,75

60,37	0,50	18,21	0,3	40	0,75
60,24	0,50	18,22	0,3	40	0,75
60,18	0,50	18,22	0,3	40	0,75
60,18	0,50	18,22	0,3	40	0,75
60,12	0,50	18,22	0,3	40	0,75
60,05	0,50	18,22	0,3	39	0,75
59,99	0,50	18,22	0,3	39	0,75
59,99	0,50	18,23	0,3	39	0,75
59,93	0,50	18,23	0,3	39	0,75
59,99	0,50	18,23	0,3	39	0,75
60,05	0,50	18,23	0,3	39	0,75
59,99	0,50	18,23	0,3	39	0,75
59,99	0,50	18,24	0,3	39	0,75
59,93	0,50	18,24	0,3	39	0,75
59,87	0,50	18,24	0,3	39	0,74
59,87	0,50	18,24	0,3	39	0,74
59,87	0,50	18,24	0,3	39	0,74
60,18	0,50	18,24	0,3	40	0,75
60,99	0,50	18,25	0,3	40	0,76
62,43	0,51	18,25	0,3	41	0,78
61,99	0,52	18,25	0,3	40	0,77
61,87	0,53	18,25	0,3	40	0,77
61,74	0,53	18,25	0,3	40	0,77
61,81	0,53	18,25	0,3	40	0,77
61,99	0,53	18,26	0,3	40	0,77
62,87	0,54	18,26	0,3	41	0,78
63,31	0,54	18,26	0,3	41	0,79
63,81	0,54	18,26	0,3	41	0,79
64,00	0,55	18,26	0,3	41	0,80
64,50	0,56	18,27	0,3	41	0,80
64,94	0,57	18,27	0,3	42	0,81
65,06	0,58	18,27	0,3	42	0,81
65,69	0,58	18,27	0,3	42	0,82
65,50	0,59	18,27	0,3	42	0,81
65,50	0,60	18,27	0,3	42	0,81
65,38	0,60	18,28	0,3	42	0,81
65,25	0,60	18,28	0,3	42	0,81
65,13	0,60	18,28	0,3	42	0,81
65,06	0,60	18,28	0,3	42	0,81
65,06	0,60	18,28	0,3	42	0,81
64,94	0,60	18,28	0,3	42	0,81
65,06	0,60	18,29	0,3	42	0,81
65,63	0,60	18,29	0,3	42	0,82
65,88	0,60	18,29	0,3	42	0,82
66,13	0,61	18,29	0,3	42	0,82

66,69	0,61	18,29	0,3	42	0,83
67,25	0,62	18,30	0,3	43	0,84
67,19	0,63	18,30	0,3	43	0,84
67,76	0,63	18,30	0,3	43	0,84
68,13	0,62	18,30	0,3	43	0,85
68,32	0,63	18,30	0,3	43	0,85
68,07	0,64	18,30	0,3	43	0,85
67,94	0,65	18,31	0,3	43	0,85
68,82	0,63	18,31	0,3	43	0,86
68,94	0,64	18,31	0,3	43	0,86
69,13	0,64	18,31	0,3	43	0,86
69,76	0,65	18,31	0,3	44	0,87
70,70	0,65	18,31	0,3	44	0,88
70,45	0,66	18,32	0,3	44	0,88
70,51	0,66	18,32	0,3	44	0,88
70,32	0,66	18,32	0,3	44	0,87
70,89	0,67	18,32	0,3	44	0,88
71,51	0,67	18,32	0,3	44	0,89
71,26	0,67	18,33	0,3	44	0,89
72,33	0,67	18,33	0,3	45	0,90
73,08	0,68	18,33	0,3	45	0,91
73,58	0,69	18,33	0,2	45	0,92
73,27	0,69	18,33	0,3	45	0,91
73,70	0,68	18,33	0,2	45	0,92
74,58	0,69	18,34	0,2	45	0,93
76,77	0,70	18,34	0,2	46	0,95
77,52	0,74	18,34	0,2	47	0,96
76,96	0,74	18,34	0,2	46	0,96
77,71	0,74	18,34	0,2	47	0,97
78,84	0,75	18,34	0,2	47	0,98
79,53	0,77	18,35	0,2	47	0,99
80,34	0,77	18,35	0,2	48	1,00
79,72	0,78	18,35	0,2	47	0,99
79,40	0,78	18,35	0,2	47	0,99
79,15	0,80	18,35	0,2	47	0,98
79,65	0,78	18,36	0,2	47	0,99
80,65	0,80	18,36	0,2	48	1,00
80,28	0,80	18,36	0,2	48	1,00
81,91	0,79	18,36	0,2	48	1,02
82,22	0,81	18,36	0,2	48	1,02
81,66	0,81	18,36	0,2	48	1,02
82,60	0,81	18,37	0,2	48	1,03
84,85	0,83	18,37	0,2	49	1,06
84,60	0,86	18,37	0,2	49	1,05
84,10	0,88	18,37	0,2	49	1,05

85,91	0,89	18,37	0,2	49	1,07
86,42	0,92	18,37	0,2	50	1,07
86,79	0,95	18,38	0,2	50	1,08
86,17	0,98	18,38	0,2	50	1,07
85,79	0,98	18,38	0,2	49	1,07
87,10	0,97	18,38	0,2	50	1,08
88,54	0,99	18,38	0,2	50	1,10
88,86	1,02	18,39	0,2	50	1,11
88,73	1,05	18,39	0,2	50	1,10
88,98	1,07	18,39	0,2	50	1,11
89,36	1,07	18,39	0,2	51	1,11
90,61	1,09	18,39	0,2	51	1,13
90,24	1,11	18,39	0,2	51	1,12
90,80	1,14	18,40	0,2	51	1,13
91,11	1,14	18,40	0,2	51	1,13
91,68	1,17	18,40	0,2	51	1,14
92,80	1,20	18,40	0,2	52	1,15
93,93	1,27	18,40	0,2	52	1,17
93,43	1,29	18,40	0,2	52	1,16
94,31	1,30	18,41	0,2	52	1,17
96,31	1,34	18,41	0,2	53	1,20
98,19	1,41	18,41	0,2	53	1,22
100,00	1,50	18,41	0,2	54	1,24
100,25	1,58	18,41	0,2	54	1,25
99,07	1,63	18,42	0,2	53	1,23
99,32	1,63	18,42	0,2	53	1,24
98,69	1,66	18,42	0,2	53	1,23
98,31	1,67	18,42	0,2	53	1,22
101,38	1,68	18,42	0,2	54	1,26
100,69	1,74	18,42	0,2	54	1,25
100,07	1,77	18,43	0,2	54	1,24
99,69	1,80	18,43	0,2	54	1,24
99,38	1,78	18,43	0,2	53	1,24
99,13	1,80	18,43	0,2	53	1,23
98,94	1,81	18,43	0,2	53	1,23
98,81	1,83	18,43	0,2	53	1,23
98,63	1,81	18,44	0,2	53	1,23
98,69	1,81	18,44	0,2	53	1,23
101,70	1,81	18,44	0,2	54	1,26
102,01	1,85	18,44	0,2	54	1,27
104,26	1,92	18,44	0,2	55	1,30
105,14	1,99	18,45	0,2	55	1,31
103,95	2,03	18,45	0,2	55	1,29
107,46	2,07	18,45	0,2	56	1,34
106,89	2,15	18,45	0,2	55	1,33

109,27	2,26	18,45	0,2	56	1,36
107,77	2,30	18,45	0,2	56	1,34
110,09	2,33	18,46	0,2	56	1,37
109,96	2,44	18,46	0,2	56	1,37
110,96	2,46	18,46	0,2	56	1,38
110,65	2,55	18,46	0,2	56	1,38
112,03	2,60	18,46	0,2	57	1,39
111,34	2,69	18,47	0,2	56	1,38
110,90	2,72	18,47	0,2	56	1,38
110,21	2,75	18,47	0,2	56	1,37
109,77	2,76	18,47	0,2	56	1,37
109,71	2,77	18,47	0,2	56	1,36
110,40	2,79	18,47	0,2	56	1,37
110,59	2,80	18,48	0,2	56	1,38
110,15	2,82	18,48	0,2	56	1,37
110,09	2,82	18,48	0,2	56	1,37
112,22	2,85	18,48	0,2	57	1,40
111,28	2,87	18,48	0,2	56	1,38
113,40	2,92	18,48	0,2	57	1,41
112,40	3,03	18,49	0,2	57	1,40
113,84	3,08	18,49	0,2	57	1,42
113,53	3,17	18,49	0,2	57	1,41
112,78	3,22	18,49	0,2	57	1,40
115,16	3,28	18,49	0,2	57	1,43
113,97	3,35	18,50	0,2	57	1,42
116,41	3,47	18,50	0,2	58	1,45
114,59	3,56	18,50	0,2	57	1,43
116,72	3,58	18,50	0,2	58	1,45
115,53	3,70	18,50	0,2	57	1,44
114,41	3,74	18,50	0,2	57	1,42
113,78	3,77	18,51	0,2	57	1,42
116,79	3,81	18,51	0,2	58	1,45
115,60	3,91	18,51	0,2	57	1,44
117,41	4,00	18,51	0,2	58	1,46
116,91	4,14	18,51	0,2	58	1,45
118,79	4,24	18,51	0,2	58	1,48
116,85	4,41	18,52	0,2	58	1,45
118,23	4,47	18,52	0,2	58	1,47
118,04	4,61	18,52	0,2	58	1,47
118,04	4,68	18,52	0,2	58	1,47
119,85	4,84	18,52	0,2	58	1,49
117,54	4,94	18,53	0,2	58	1,46
120,23	5,02	18,53	0,2	58	1,50
119,17	5,19	18,53	0,2	58	1,48
117,54	5,25	18,53	0,2	58	1,46

118,85	5,28	18,53	0,2	58	1,48
119,98	5,50	18,53	0,2	58	1,49
120,73	5,61	18,54	0,2	58	1,50
121,17	5,93	18,54	0,2	59	1,51
120,48	6,01	18,54	0,2	58	1,50
120,86	6,13	18,54	0,2	58	1,50
119,04	6,23	18,54	0,2	58	1,48
119,35	6,26	18,54	0,2	58	1,48
118,23	6,32	18,55	0,2	58	1,47
117,54	6,36	18,55	0,2	58	1,46
117,10	6,38	18,55	0,2	58	1,46
119,35	6,38	18,55	0,2	58	1,48
118,23	6,43	18,55	0,2	58	1,47
117,54	6,46	18,56	0,2	58	1,46
117,04	6,49	18,56	0,2	58	1,46
116,66	6,49	18,56	0,2	58	1,45
116,41	6,51	18,56	0,2	57	1,45
117,54	6,52	18,56	0,2	58	1,46
118,23	6,55	18,56	0,2	58	1,47
117,54	6,56	18,57	0,2	58	1,46
117,04	6,58	18,57	0,2	58	1,46
119,35	6,61	18,57	0,2	58	1,48
118,98	6,71	18,57	0,2	58	1,48
117,85	6,75	18,57	0,2	58	1,47
121,30	6,87	18,57	0,2	59	1,51
120,17	7,08	18,58	0,2	58	1,49
118,79	7,13	18,58	0,2	58	1,48
121,55	7,28	18,58	0,2	59	1,51
121,73	7,48	18,58	0,2	59	1,51
119,73	7,56	18,58	0,2	58	1,49
122,80	7,71	18,59	0,2	59	1,53
122,17	8,03	18,59	0,2	59	1,52
120,17	8,11	18,59	0,2	58	1,49
124,61	8,35	18,59	0,1	59	1,55
122,42	8,63	18,59	0,2	59	1,52
126,12	8,73	18,59	0,1	59	1,57
122,80	9,25	18,60	0,2	59	1,53
126,18	9,44	18,60	0,1	59	1,57
123,05	9,84	18,60	0,2	59	1,53
121,92	9,90	18,60	0,2	59	1,52
123,36	9,92	18,60	0,2	59	1,53
123,49	10,27	18,60	0,2	59	1,54
123,80	10,33	18,61	0,2	59	1,54
124,55	10,79	18,61	0,1	59	1,55
122,48	10,89	18,61	0,2	59	1,52

124,99	11,51	18,61	0,1	59	1,55
128,37	11,86	18,61	0,1	60	1,60
123,11	12,17	18,61	0,2	59	1,53
122,67	12,45	18,61	0,2	59	1,53
122,99	12,74	18,61	0,2	59	1,53
122,55	13,20	18,61	0,2	59	1,52
124,24	13,48	18,60	0,1	59	1,55
120,36	13,67	18,60	0,2	58	1,50
121,42	13,99	18,60	0,2	59	1,51
121,61	14,03	18,60	0,2	59	1,51
120,73	14,37	18,60	0,2	58	1,50
121,42	14,72	18,60	0,2	59	1,51
123,61	15,02	18,59	0,2	59	1,54
115,72	15,50	18,59	0,2	57	1,44
113,66	16,21	18,59	0,2	57	1,41
112,65	16,98	18,59	0,2	57	1,40
112,40	17,65	18,59	0,2	57	1,40
110,65	18,24	18,59	0,2	56	1,38
105,70	18,56	18,58	0,2	55	1,31
108,40	18,69	18,58	0,2	56	1,35
104,20	19,08	18,58	0,2	55	1,30
102,82	19,14	18,58	0,2	54	1,28
102,26	19,16	18,58	0,2	54	1,27
106,02	19,23	18,57	0,2	55	1,32
99,69	19,96	18,57	0,2	53	1,24
98,81	20,02	18,57	0,2	53	1,23
98,38	20,04	18,57	0,2	53	1,22
98,13	20,06	18,57	0,2	53	1,22
97,94	20,06	18,57	0,2	53	1,22
97,75	20,08	18,56	0,2	53	1,22
97,69	20,08	18,56	0,2	53	1,22
97,62	20,09	18,56	0,2	53	1,21
97,50	20,11	18,56	0,2	53	1,21
97,44	20,10	18,56	0,2	53	1,21
97,37	20,10	18,56	0,2	53	1,21
97,25	20,10	18,55	0,2	53	1,21

Corpo de prova CP.2.H60:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Ned (tirante) kN)	μ	Θ (°)	T (Mpa)
0,00	0,00	17,99	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00
2,88	0,15	17,99	6,24	2,29	0,04
10,71	0,16	17,99	1,68	8,46	0,13
20,98	0,16	17,99	0,86	16,25	0,26

24,42	0,20	18,00	0,74	18,74	0,30
29,31	0,24	18,00	0,61	22,15	0,36
31,69	0,29	18,00	0,57	23,75	0,39
35,57	0,32	18,00	0,51	26,29	0,44
37,70	0,34	18,00	0,48	27,63	0,47
39,26	0,36	18,00	0,46	28,60	0,49
42,08	0,39	18,01	0,43	30,30	0,52
43,58	0,43	18,01	0,41	31,18	0,54
46,09	0,44	18,01	0,39	32,61	0,57
45,71	0,45	18,01	0,39	32,40	0,57
46,34	0,46	18,01	0,39	32,75	0,58
47,65	0,47	18,01	0,38	33,48	0,59
49,66	0,44	18,01	0,36	34,57	0,62
51,91	0,46	18,02	0,35	35,77	0,65
51,79	0,46	18,02	0,35	35,70	0,64
52,48	0,46	18,02	0,34	36,06	0,65
53,42	0,47	18,02	0,34	36,54	0,66
56,92	0,47	18,02	0,32	38,29	0,71
56,92	0,48	18,02	0,32	38,29	0,71
56,98	0,49	18,03	0,32	38,32	0,71
57,99	0,50	18,03	0,31	38,80	0,72
59,99	0,50	18,03	0,30	39,76	0,75
59,80	0,50	18,03	0,30	39,67	0,74
59,43	0,51	18,03	0,30	39,49	0,74
59,30	0,51	18,03	0,30	39,42	0,74
59,30	0,51	18,03	0,30	39,42	0,74
59,43	0,50	18,04	0,30	39,48	0,74
59,24	0,51	18,04	0,30	39,39	0,74
59,43	0,51	18,04	0,30	39,47	0,74
59,24	0,51	18,04	0,30	39,38	0,74
61,43	0,49	18,04	0,29	40,40	0,76
63,06	0,53	18,04	0,29	41,14	0,78
62,62	0,58	18,05	0,29	40,94	0,78
65,44	0,62	18,05	0,28	42,19	0,81
66,44	0,67	18,05	0,27	42,62	0,83
67,07	0,70	18,05	0,27	42,89	0,83
69,32	0,75	18,05	0,26	43,83	0,86
69,51	0,78	18,05	0,26	43,91	0,86
69,26	0,80	18,05	0,26	43,80	0,86
70,07	0,80	18,06	0,26	44,13	0,87
69,76	0,81	18,06	0,26	44,00	0,87
69,76	0,82	18,06	0,26	44,00	0,87
70,07	0,82	18,06	0,26	44,13	0,87
69,76	0,82	18,06	0,26	43,99	0,87

69,63	0,83	18,06	0,26	43,94	0,87
69,45	0,84	18,07	0,26	43,86	0,86
69,32	0,83	18,07	0,26	43,81	0,86
69,20	0,82	18,07	0,26	43,75	0,86
69,07	0,83	18,07	0,26	43,70	0,86
69,01	0,84	18,07	0,26	43,67	0,86
68,88	0,83	18,07	0,26	43,62	0,86
68,82	0,84	18,08	0,26	43,59	0,86
68,76	0,83	18,08	0,26	43,56	0,86
68,69	0,83	18,08	0,26	43,53	0,85
68,63	0,84	18,08	0,26	43,50	0,85
68,51	0,84	18,08	0,26	43,45	0,85
68,44	0,83	18,08	0,26	43,42	0,85
68,38	0,84	18,08	0,26	43,39	0,85
68,32	0,84	18,09	0,26	43,36	0,85
68,32	0,84	18,09	0,26	43,36	0,85
68,19	0,84	18,09	0,27	43,30	0,85
68,19	0,84	18,09	0,27	43,30	0,85
68,13	0,84	18,09	0,27	43,27	0,85
68,32	0,85	18,09	0,26	43,35	0,85
68,88	0,85	18,10	0,26	43,58	0,86
69,20	0,84	18,10	0,26	43,71	0,86
71,64	0,84	18,10	0,25	44,70	0,89
72,83	0,87	18,10	0,25	45,17	0,91
72,39	0,89	18,10	0,25	44,99	0,90
72,08	0,90	18,10	0,25	44,87	0,90
72,83	0,91	18,10	0,25	45,16	0,91
73,52	0,93	18,11	0,25	45,43	0,91
73,95	0,95	18,11	0,24	45,60	0,92
73,58	0,94	18,11	0,25	45,45	0,92
73,64	0,95	18,11	0,25	45,47	0,92
73,64	0,95	18,11	0,25	45,47	0,92
73,95	0,95	18,11	0,24	45,59	0,92
75,52	0,97	18,12	0,24	46,18	0,94
75,08	0,98	18,12	0,24	46,01	0,93
74,89	0,99	18,12	0,24	45,94	0,93
74,71	1,00	18,12	0,24	45,87	0,93
74,58	0,99	18,12	0,24	45,81	0,93
74,46	1,00	18,12	0,24	45,76	0,93
74,39	1,00	18,13	0,24	45,74	0,93
74,27	1,00	18,13	0,24	45,69	0,92
74,20	1,00	18,13	0,24	45,66	0,92
74,14	1,01	18,13	0,24	45,63	0,92
74,08	1,00	18,13	0,24	45,61	0,92
74,02	1,01	18,13	0,24	45,58	0,92

73,89	1,01	18,13	0,25	45,53	0,92
73,83	1,00	18,14	0,25	45,50	0,92
73,77	1,01	18,14	0,25	45,48	0,92
73,70	1,02	18,14	0,25	45,45	0,92
73,64	1,01	18,14	0,25	45,42	0,92
73,64	1,00	18,14	0,25	45,42	0,92
73,58	1,01	18,14	0,25	45,39	0,92
73,52	1,01	18,15	0,25	45,37	0,91
73,45	1,00	18,15	0,25	45,34	0,91
73,45	1,02	18,15	0,25	45,34	0,91
73,39	1,01	18,15	0,25	45,31	0,91
73,33	1,02	18,15	0,25	45,28	0,91
73,33	1,01	18,15	0,25	45,28	0,91
74,83	1,01	18,15	0,24	45,86	0,93
75,58	1,01	18,16	0,24	46,14	0,94
76,52	1,01	18,16	0,24	46,49	0,95
76,27	1,03	18,16	0,24	46,40	0,95
76,08	1,03	18,16	0,24	46,32	0,95
78,02	1,05	18,16	0,23	47,04	0,97
77,52	1,06	18,16	0,23	46,86	0,96
77,34	1,07	18,17	0,23	46,78	0,96
77,15	1,08	18,17	0,24	46,71	0,96
76,77	1,09	18,17	0,24	46,57	0,95
77,65	1,09	18,17	0,23	46,89	0,97
77,59	1,09	18,17	0,23	46,87	0,97
77,46	1,09	18,17	0,23	46,82	0,96
77,34	1,08	18,18	0,24	46,77	0,96
77,21	1,11	18,18	0,24	46,72	0,96
77,15	1,10	18,18	0,24	46,70	0,96
77,02	1,09	18,18	0,24	46,65	0,96
77,02	1,11	18,18	0,24	46,64	0,96
76,96	1,10	18,18	0,24	46,62	0,96
76,90	1,11	18,18	0,24	46,59	0,96
76,84	1,11	18,19	0,24	46,57	0,96
76,77	1,09	18,19	0,24	46,54	0,95
76,77	1,11	18,19	0,24	46,54	0,95
76,71	1,11	18,19	0,24	46,51	0,95
76,65	1,11	18,19	0,24	46,49	0,95
78,46	1,08	18,19	0,23	47,15	0,98
79,53	1,10	18,20	0,23	47,54	0,99
79,40	1,11	18,20	0,23	47,49	0,99
79,40	1,12	18,20	0,23	47,49	0,99
79,21	1,12	18,20	0,23	47,42	0,99
79,03	1,13	18,20	0,23	47,35	0,98
78,96	1,14	18,20	0,23	47,32	0,98

78,84	1,13	18,20	0,23	47,27	0,98
78,78	1,14	18,21	0,23	47,25	0,98
78,65	1,14	18,21	0,23	47,20	0,98
78,65	1,15	18,21	0,23	47,20	0,98
78,78	1,15	18,21	0,23	47,24	0,98
78,71	1,15	18,21	0,23	47,22	0,98
78,65	1,14	18,21	0,23	47,19	0,98
79,72	1,14	18,22	0,23	47,57	0,99
80,40	1,15	18,22	0,23	47,81	1,00
80,28	1,15	18,22	0,23	47,77	1,00
80,09	1,15	18,22	0,23	47,70	1,00
80,03	1,15	18,22	0,23	47,67	1,00
79,97	1,16	18,22	0,23	47,65	0,99
80,03	1,16	18,23	0,23	47,67	1,00
79,97	1,17	18,23	0,23	47,64	0,99
79,90	1,17	18,23	0,23	47,62	0,99
79,84	1,18	18,23	0,23	47,59	0,99
81,59	1,17	18,23	0,22	48,21	1,01
81,84	1,18	18,23	0,22	48,30	1,02
81,66	1,19	18,23	0,22	48,23	1,02
81,84	1,19	18,24	0,22	48,29	1,02
84,73	1,21	18,24	0,22	49,27	1,05
85,48	1,26	18,24	0,21	49,52	1,06
84,91	1,28	18,24	0,21	49,33	1,06
84,60	1,29	18,24	0,22	49,22	1,05
86,17	1,31	18,24	0,21	49,74	1,07
86,98	1,35	18,25	0,21	50,00	1,08
86,54	1,36	18,25	0,21	49,86	1,08
86,23	1,38	18,25	0,21	49,75	1,07
87,04	1,38	18,25	0,21	50,01	1,08
86,79	1,40	18,25	0,21	49,93	1,08
86,54	1,40	18,25	0,21	49,85	1,08
86,35	1,41	18,25	0,21	49,78	1,07
86,29	1,41	18,26	0,21	49,76	1,07
87,17	1,41	18,26	0,21	50,04	1,08
87,23	1,43	18,26	0,21	50,06	1,08
88,42	1,42	18,26	0,21	50,44	1,10
88,73	1,45	18,26	0,21	50,54	1,10
88,29	1,47	18,26	0,21	50,40	1,10
87,92	1,49	18,27	0,21	50,27	1,09
91,17	1,50	18,27	0,20	51,29	1,13
92,49	1,59	18,27	0,20	51,69	1,15
92,68	1,65	18,27	0,20	51,74	1,15
93,43	1,67	18,27	0,20	51,96	1,16
96,18	1,72	18,27	0,19	52,77	1,20

95,75	1,81	18,27	0,19	52,64	1,19
96,69	1,83	18,28	0,19	52,91	1,20
100,76	1,96	18,28	0,18	54,03	1,25
99,25	2,05	18,28	0,18	53,62	1,23
98,56	2,07	18,28	0,19	53,43	1,23
99,38	2,08	18,28	0,18	53,65	1,24
101,70	2,13	18,28	0,18	54,28	1,26
101,82	2,21	18,29	0,18	54,31	1,27
101,82	2,24	18,29	0,18	54,31	1,27
105,64	2,33	18,29	0,17	55,30	1,31
104,64	2,43	18,29	0,17	55,04	1,30
103,64	2,45	18,29	0,18	54,78	1,29
105,33	2,49	18,29	0,17	55,21	1,31
105,20	2,54	18,30	0,17	55,18	1,31
104,33	2,58	18,30	0,18	54,95	1,30
107,52	2,63	18,30	0,17	55,75	1,34
106,45	2,69	18,30	0,17	55,49	1,32
105,64	2,72	18,30	0,17	55,28	1,31
109,77	2,79	18,30	0,17	56,30	1,37
108,90	2,90	18,30	0,17	56,08	1,35
107,83	2,93	18,31	0,17	55,82	1,34
107,14	2,95	18,31	0,17	55,65	1,33
106,64	2,96	18,31	0,17	55,52	1,33
106,27	2,98	18,31	0,17	55,42	1,32
105,89	2,98	18,31	0,17	55,33	1,32
105,58	2,98	18,31	0,17	55,24	1,31
105,26	2,98	18,32	0,17	55,16	1,31
105,20	2,99	18,32	0,17	55,14	1,31
104,95	2,99	18,32	0,17	55,08	1,31
104,70	3,00	18,32	0,17	55,01	1,30
104,45	3,00	18,32	0,18	54,94	1,30
104,51	3,00	18,32	0,18	54,96	1,30
104,76	3,00	18,32	0,17	55,02	1,30
106,52	2,98	18,33	0,17	55,46	1,32
106,77	2,99	18,33	0,17	55,52	1,33
111,96	3,04	18,33	0,16	56,78	1,39
111,09	3,18	18,33	0,17	56,57	1,38
110,40	3,21	18,33	0,17	56,41	1,37
109,90	3,21	18,33	0,17	56,28	1,37
109,59	3,23	18,34	0,17	56,21	1,36
109,33	3,24	18,34	0,17	56,14	1,36
109,08	3,25	18,34	0,17	56,08	1,36
108,96	3,25	18,34	0,17	56,05	1,36
108,77	3,25	18,34	0,17	56,00	1,35
108,65	3,25	18,34	0,17	55,97	1,35

108,65	3,26	18,35	0,17	55,96	1,35
108,96	3,27	18,35	0,17	56,04	1,36
108,77	3,27	18,35	0,17	55,99	1,35
108,65	3,27	18,35	0,17	55,96	1,35
108,58	3,27	18,35	0,17	55,94	1,35
110,09	3,28	18,35	0,17	56,30	1,37
110,02	3,29	18,35	0,17	56,28	1,37
109,96	3,30	18,36	0,17	56,27	1,37
109,77	3,30	18,36	0,17	56,22	1,37
110,77	3,32	18,36	0,17	56,46	1,38
110,65	3,33	18,36	0,17	56,43	1,38
111,40	3,33	18,36	0,16	56,60	1,39
113,28	3,39	18,36	0,16	57,04	1,41
112,72	3,41	18,37	0,16	56,91	1,40
112,28	3,43	18,37	0,16	56,80	1,40
111,90	3,43	18,37	0,16	56,71	1,39
111,59	3,46	18,37	0,16	56,64	1,39
111,40	3,46	18,37	0,16	56,59	1,39
111,21	3,46	18,37	0,17	56,54	1,38
111,03	3,48	18,37	0,17	56,50	1,38
111,28	3,48	18,38	0,17	56,55	1,38
114,28	3,52	18,38	0,16	57,25	1,42
113,34	3,55	18,38	0,16	57,03	1,41
112,90	3,57	18,38	0,16	56,93	1,40
112,53	3,58	18,38	0,16	56,84	1,40
112,28	3,59	18,38	0,16	56,78	1,40
112,03	3,60	18,39	0,16	56,72	1,39
111,90	3,60	18,39	0,16	56,68	1,39
111,71	3,60	18,39	0,16	56,64	1,39
111,59	3,61	18,39	0,16	56,61	1,39
111,46	3,62	18,39	0,17	56,57	1,39
111,34	3,62	18,39	0,17	56,54	1,38
112,09	3,62	18,40	0,16	56,72	1,39
112,15	3,62	18,40	0,16	56,73	1,39
111,96	3,62	18,40	0,16	56,68	1,39
111,90	3,65	18,40	0,16	56,67	1,39
111,71	3,65	18,40	0,16	56,62	1,39
112,28	3,64	18,40	0,16	56,75	1,40
112,22	3,65	18,40	0,16	56,73	1,40
115,28	3,68	18,41	0,16	57,44	1,43
114,97	3,73	18,41	0,16	57,36	1,43
114,28	3,75	18,41	0,16	57,20	1,42
114,78	3,78	18,41	0,16	57,32	1,43
114,28	3,80	18,41	0,16	57,20	1,42
113,97	3,81	18,41	0,16	57,13	1,42

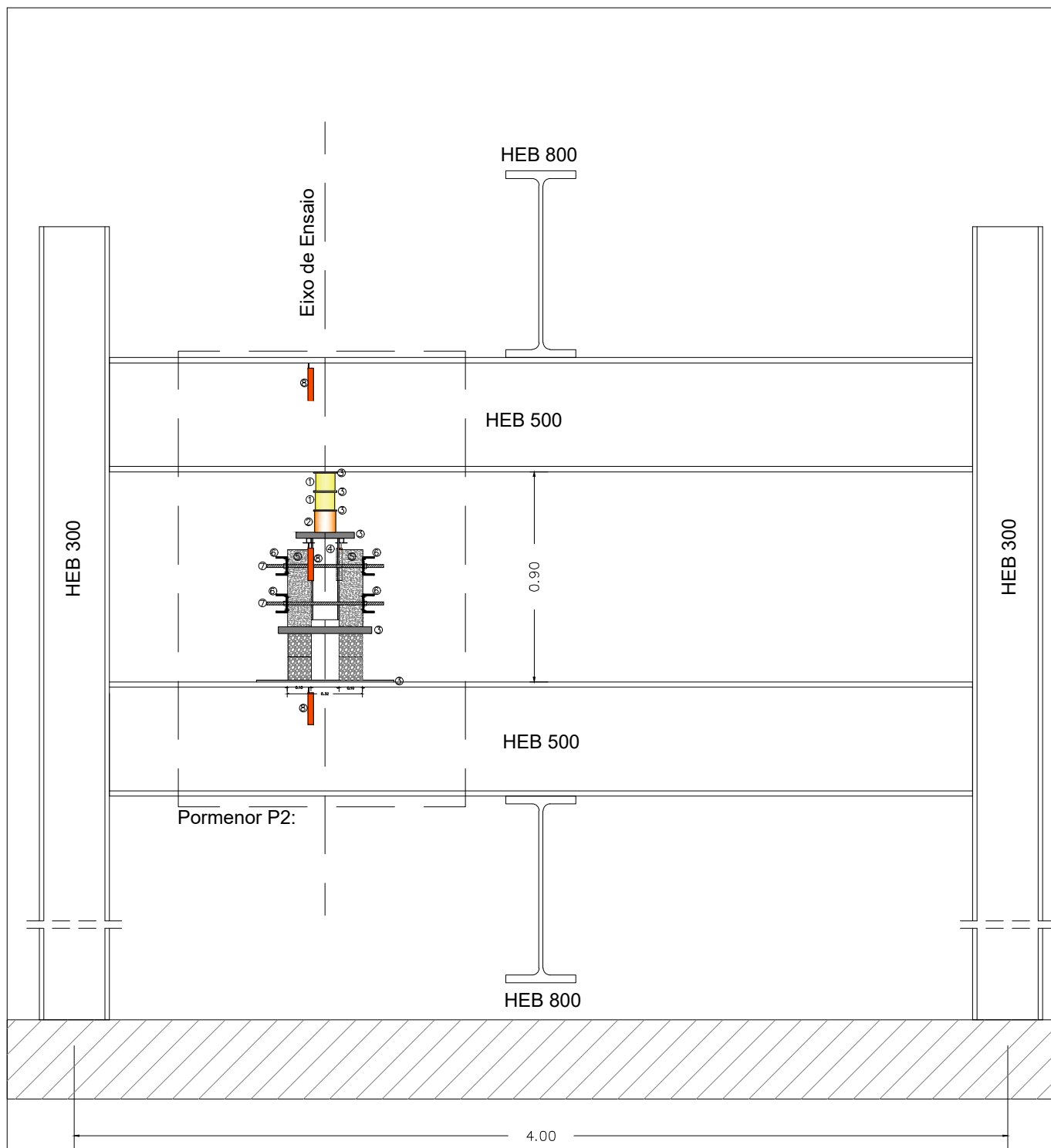
114,22	3,82	18,42	0,16	57,18	1,42
113,97	3,83	18,42	0,16	57,12	1,42
113,72	3,83	18,42	0,16	57,06	1,41
113,53	3,84	18,42	0,16	57,02	1,41
113,40	3,85	18,42	0,16	56,99	1,41
113,22	3,85	18,42	0,16	56,94	1,41
113,15	3,85	18,42	0,16	56,92	1,41
113,03	3,86	18,43	0,16	56,89	1,41
112,90	3,86	18,43	0,16	56,86	1,40
112,84	3,87	18,43	0,16	56,84	1,40
112,72	3,87	18,43	0,16	56,81	1,40
112,65	3,87	18,43	0,16	56,80	1,40
112,97	3,87	18,43	0,16	56,87	1,41
112,90	3,87	18,44	0,16	56,85	1,40
112,78	3,88	18,44	0,16	56,82	1,40
113,91	3,88	18,44	0,16	57,08	1,42
114,85	3,89	18,44	0,16	57,29	1,43
114,59	3,90	18,44	0,16	57,23	1,43
114,34	3,92	18,44	0,16	57,17	1,42
115,22	3,90	18,45	0,16	57,37	1,43
116,79	3,96	18,45	0,16	57,71	1,45
116,04	3,98	18,45	0,16	57,55	1,44
115,66	4,00	18,45	0,16	57,46	1,44
115,35	4,01	18,45	0,16	57,39	1,43
116,79	4,00	18,45	0,16	57,71	1,45
118,67	4,08	18,45	0,16	58,12	1,48
117,66	4,11	18,46	0,16	57,90	1,46
118,48	4,15	18,46	0,16	58,07	1,47
117,85	4,17	18,46	0,16	57,93	1,47
117,41	4,18	18,46	0,16	57,83	1,46
119,79	4,22	18,46	0,15	58,35	1,49
119,23	4,25	18,46	0,15	58,22	1,48
118,60	4,29	18,47	0,16	58,09	1,48
118,16	4,29	18,47	0,16	57,99	1,47
117,91	4,31	18,47	0,16	57,93	1,47
117,66	4,31	18,47	0,16	57,88	1,46
123,42	4,42	18,47	0,15	59,09	1,54
121,11	4,52	18,47	0,15	58,61	1,51
120,36	4,55	18,47	0,15	58,45	1,50
124,49	4,62	18,48	0,15	59,30	1,55
122,36	4,75	18,48	0,15	58,87	1,52
121,48	4,80	18,48	0,15	58,68	1,51
121,55	4,81	18,48	0,15	58,69	1,51
121,48	4,84	18,48	0,15	58,68	1,51
120,98	4,85	18,48	0,15	58,57	1,50

125,24	5,04	18,49	0,15	59,44	1,56
123,30	5,18	18,49	0,15	59,05	1,53
122,30	5,23	18,49	0,15	58,84	1,52
122,48	5,24	18,49	0,15	58,87	1,52
123,80	5,33	18,49	0,15	59,14	1,54
122,48	5,37	18,49	0,15	58,87	1,52
125,18	5,59	18,49	0,15	59,42	1,56
123,11	5,71	18,50	0,15	59,00	1,53
123,67	5,77	18,50	0,15	59,11	1,54
123,74	5,90	18,50	0,15	59,12	1,54
122,17	5,96	18,50	0,15	58,79	1,52
121,48	5,99	18,50	0,15	58,65	1,51
121,92	6,00	18,50	0,15	58,74	1,52
123,49	6,09	18,51	0,15	59,06	1,54
122,23	6,15	18,51	0,15	58,80	1,52
124,43	6,26	18,51	0,15	59,25	1,55
122,86	6,32	18,51	0,15	58,92	1,53
122,36	6,36	18,51	0,15	58,82	1,52
123,11	6,42	18,51	0,15	58,97	1,53
122,30	6,46	18,52	0,15	58,80	1,52
127,18	6,64	18,52	0,15	59,78	1,58
124,55	6,80	18,52	0,15	59,26	1,55
123,74	6,84	18,52	0,15	59,09	1,54
123,24	6,86	18,52	0,15	58,99	1,53
122,86	6,87	18,52	0,15	58,91	1,53
122,61	6,89	18,52	0,15	58,85	1,53
122,36	6,89	18,53	0,15	58,80	1,52
122,36	6,90	18,53	0,15	58,80	1,52
125,11	6,99	18,53	0,15	59,36	1,56
123,99	7,03	18,53	0,15	59,13	1,54
124,05	7,05	18,53	0,15	59,14	1,54
123,55	7,08	18,53	0,15	59,03	1,54
123,11	7,09	18,54	0,15	58,94	1,53
123,74	7,11	18,54	0,15	59,07	1,54
123,30	7,13	18,54	0,15	58,98	1,53
122,92	7,15	18,54	0,15	58,90	1,53
122,67	7,16	18,54	0,15	58,84	1,53
122,42	7,17	18,54	0,15	58,79	1,52
122,23	7,17	18,54	0,15	58,75	1,52
123,55	7,19	18,55	0,15	59,02	1,54
123,30	7,20	18,55	0,15	58,96	1,53
125,74	7,23	18,55	0,15	59,46	1,56
124,99	7,38	18,55	0,15	59,30	1,55
123,93	7,42	18,55	0,15	59,09	1,54
123,36	7,44	18,55	0,15	58,97	1,53

122,99	7,46	18,56	0,15	58,89	1,53
122,67	7,46	18,56	0,15	58,82	1,53
122,48	7,47	18,56	0,15	58,78	1,52
123,30	7,49	18,56	0,15	58,95	1,53
122,99	7,49	18,56	0,15	58,88	1,53
122,74	7,51	18,56	0,15	58,83	1,53
122,55	7,51	18,57	0,15	58,79	1,52
122,36	7,53	18,57	0,15	58,74	1,52
122,17	7,53	18,57	0,15	58,70	1,52
122,05	7,53	18,57	0,15	58,67	1,52
121,86	7,55	18,57	0,15	58,63	1,52
121,80	7,55	18,57	0,15	58,62	1,51
121,67	7,55	18,57	0,15	58,59	1,51
121,55	7,55	18,58	0,15	58,56	1,51
121,48	7,55	18,58	0,15	58,55	1,51
121,36	7,56	18,58	0,15	58,52	1,51
121,30	7,56	18,58	0,15	58,50	1,51
125,18	7,70	18,58	0,15	59,30	1,56
126,68	7,88	18,58	0,15	59,60	1,58
127,56	7,97	18,59	0,15	59,77	1,59
125,49	8,30	18,59	0,15	59,35	1,56
127,87	8,43	18,59	0,15	59,82	1,59
125,62	8,64	18,59	0,15	59,38	1,56
129,06	8,88	18,59	0,14	60,05	1,61
126,24	8,99	18,59	0,15	59,50	1,57
127,81	9,05	18,59	0,15	59,80	1,59
127,24	9,21	18,60	0,15	59,69	1,58
125,93	9,26	18,60	0,15	59,43	1,57
127,37	9,31	18,60	0,15	59,71	1,58
126,05	9,39	18,60	0,15	59,45	1,57
128,50	9,46	18,60	0,14	59,93	1,60
126,49	9,63	18,60	0,15	59,53	1,57
129,69	9,77	18,61	0,14	60,15	1,61
127,56	9,98	18,61	0,15	59,74	1,59
130,25	10,07	18,61	0,14	60,25	1,62
127,74	10,28	18,61	0,15	59,77	1,59
127,37	10,33	18,61	0,15	59,69	1,58
127,37	10,72	18,61	0,15	59,69	1,58
125,93	10,77	18,61	0,15	59,41	1,57
125,24	10,81	18,61	0,15	59,27	1,56
124,74	10,83	18,61	0,15	59,17	1,55
124,68	10,84	18,61	0,15	59,16	1,55
126,43	11,20	18,61	0,15	59,52	1,57
127,81	11,31	18,60	0,15	59,79	1,59
124,68	11,67	18,60	0,15	59,17	1,55

125,87	12,13	18,60	0,15	59,41	1,57
121,67	12,28	18,60	0,15	58,56	1,51
120,79	12,34	18,60	0,15	58,37	1,50
120,29	12,36	18,60	0,15	58,27	1,50
119,85	12,38	18,59	0,16	58,18	1,49
119,60	12,38	18,59	0,16	58,13	1,49
124,05	12,48	18,59	0,15	59,06	1,54
120,04	12,65	18,59	0,15	58,22	1,49
120,79	12,98	18,59	0,15	58,39	1,50
121,04	13,08	18,59	0,15	58,44	1,51
118,48	13,44	18,59	0,16	57,89	1,47
118,10	14,00	18,58	0,16	57,81	1,47
120,04	14,23	18,58	0,15	58,23	1,49
116,35	14,68	18,58	0,16	57,43	1,45
117,98	14,88	18,58	0,16	57,79	1,47
115,97	15,04	18,58	0,16	57,35	1,44
117,73	15,43	18,58	0,16	57,74	1,46
118,10	15,61	18,57	0,16	57,83	1,47
112,97	16,04	18,57	0,16	56,67	1,41
115,03	16,52	18,57	0,16	57,15	1,43
111,03	16,76	18,57	0,17	56,22	1,38
110,27	16,80	18,57	0,17	56,04	1,37
112,03	17,17	18,57	0,17	56,46	1,39
113,09	17,51	18,57	0,16	56,71	1,41
106,58	17,92	18,56	0,17	55,13	1,33
104,89	18,50	18,56	0,18	54,71	1,30
104,95	19,02	18,56	0,18	54,72	1,31
104,39	19,23	18,56	0,18	54,58	1,30
98,31	19,80	18,56	0,19	52,95	1,22
97,44	19,84	18,56	0,19	52,70	1,21
96,94	19,86	18,55	0,19	52,56	1,21
96,69	19,87	18,55	0,19	52,49	1,20
96,50	19,89	18,55	0,19	52,44	1,20
96,25	19,90	18,55	0,19	52,37	1,20
96,12	19,91	18,55	0,19	52,34	1,20
102,13	20,04	18,55	0,18	54,01	1,27
98,31	20,42	18,54	0,19	52,96	1,22
94,74	20,94	18,54	0,20	51,94	1,18
92,93	21,46	18,54	0,20	51,41	1,16
93,87	21,95	18,54	0,20	51,69	1,17
91,36	22,07	18,54	0,20	50,94	1,14
90,80	22,10	18,54	0,20	50,76	1,13
90,55	22,11	18,54	0,20	50,69	1,13
90,30	22,12	18,53	0,21	50,61	1,12

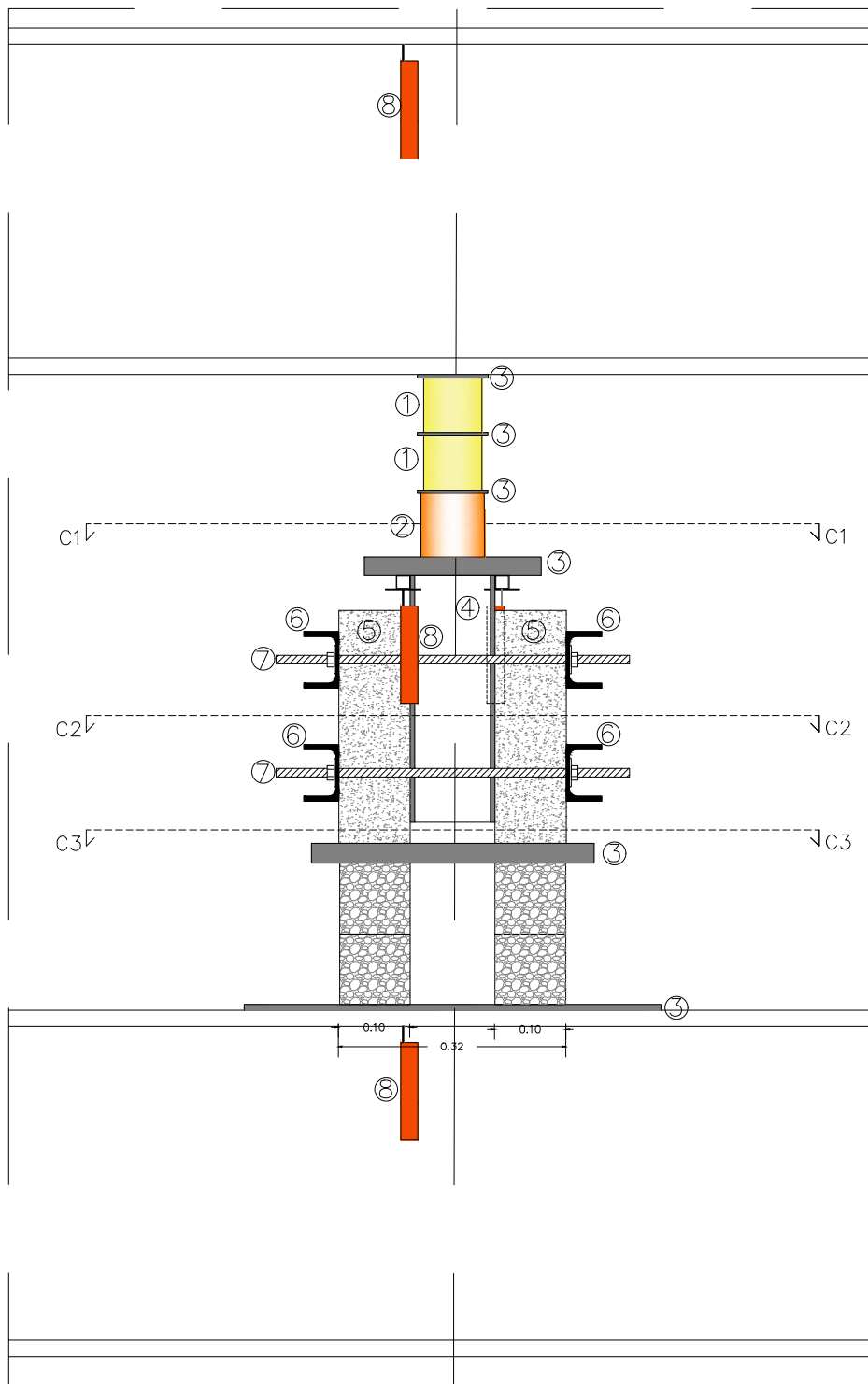
Anexo 5 - Montagem laboratorial - segunda fase de ensaios



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200



UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: 2ª Fase de ensaios laboratoriais - Alçado da montagem laboratorial	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 01
	ESCALA: 1:25	REVISÃO Nº 00

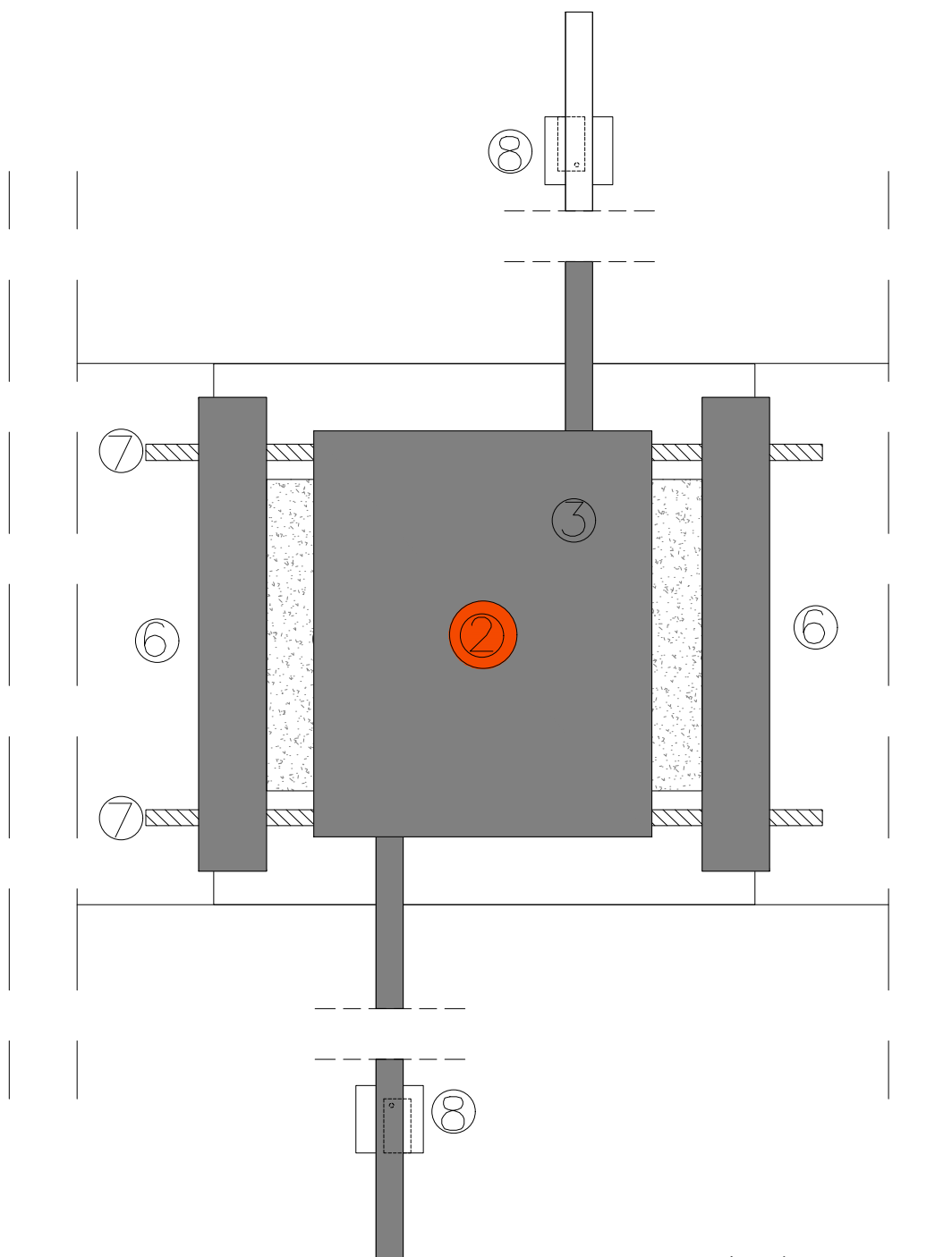


- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200

Pormenor P2:



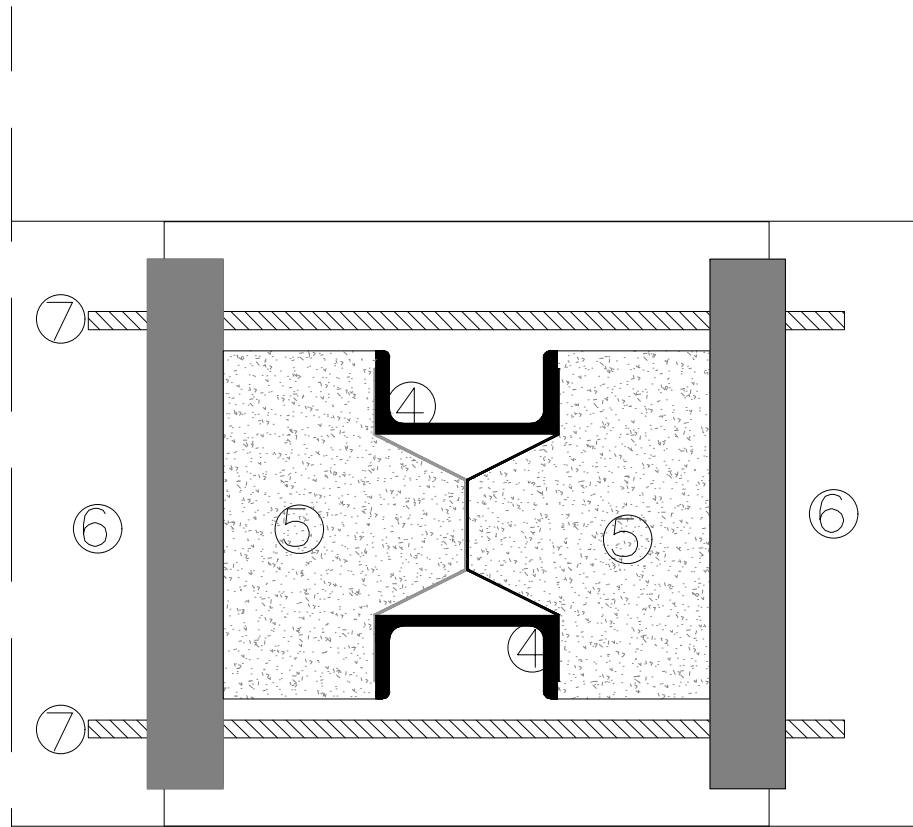
UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: Pormenor de montagem - P2	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 02
	ESCALA: 1:10	REVISÃO Nº 00



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200



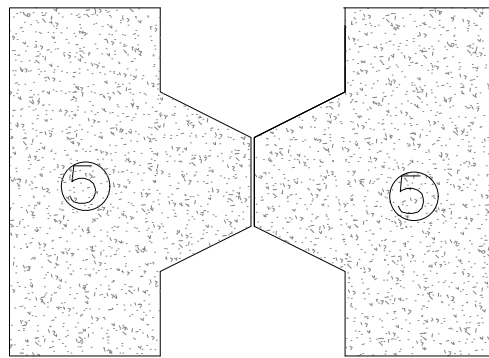
UBI- Universidade da Beira Interior	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº
DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil		03
TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface	ESCALA:	REVISÃO Nº
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 1	1:5	00



- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200



UBI- Universidade da Beira Interior	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº
DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil		04
TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface	ESCALA:	REVISÃO Nº
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 2	1:5	00




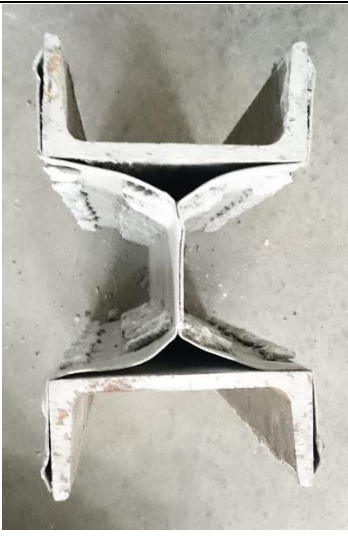







- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200



UBI- Universidade da Beira Interior DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 3	DATA: JUNHO 2016	FOLHA Nº 05
	ESCALA: 1:5	REVISÃO Nº 00

Anexo 6 - Registo fotográfico - segunda fase de ensaios

		
<p>Montagem Laboratorial</p>	<p>Montagem Laboratorial</p>	<p>Provete CP.4.NSP após rotura</p>
		
<p>Provete CP.3.NSP após rotura</p>	<p>Provete CP.3.H60 após rotura</p>	<p>Parte metálica após rotura – CP.4.NSP</p>
		
<p>Corpo de betão após rotura - CP.3.NSP</p>	<p>Corpo de betão após rotura - CP.4.NSP</p>	<p>Esmagamento de betão nas bossas – CP.3.NSP</p>

		
<p>Zona das bossas após rotura – CP.3.NSP</p>	<p>Deformação da chapa perfilada - CP.4.NSP</p>	<p>Interface aço-betão após rotura –CP.4.NSP</p>
		
<p>Esmagamento de betão na zona das bossas – CP.3.NSP</p>	<p>Esmagamento de betão na zona das bossas – CP.3.NSP</p>	<p>Parte metálica após rotura – CP.3.NSP</p>
		
<p>Parte metálica após rotura – CP.4.NSP</p>	<p>Esmagamento de betão na zona das bossas – CP.4.NSP</p>	<p>Deformação da chapa perfilada - CP.3.NSP</p>

Anexo 7 - Informação técnica recolhida - segunda fase de ensaios

Corpo de prova CP.3.NSP:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Extensão média($\mu\varepsilon$)	Ned (tirante) kN)	μ	Θ (°)	TAU
0,00	0,02	0,00	6,49	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00
2,12	0,94	2,42	6,53	3,08	4,64	0,03
9,93	1,26	3,87	6,55	0,66	20,76	0,12
9,93	1,26	3,87	6,55	0,66	20,76	0,12
9,77	1,26	4,84	6,56	0,67	20,41	0,12
18,40	1,31	4,84	6,56	0,36	35,02	0,23
18,40	1,30	4,84	6,56	0,36	35,02	0,23
22,79	1,27	5,32	6,57	0,29	40,92	0,28
22,63	1,27	4,84	6,56	0,29	40,76	0,28
22,47	1,27	4,84	6,56	0,29	40,56	0,28
22,63	1,27	4,84	6,56	0,29	40,76	0,28
22,47	1,27	4,84	6,56	0,29	40,56	0,28
22,47	1,26	3,39	6,54	0,29	40,65	0,28
27,02	1,26	3,87	6,55	0,24	45,89	0,34
34,51	1,22	4,84	6,56	0,19	52,74	0,43
36,63	1,22	5,81	6,58	0,18	54,30	0,46
46,72	1,21	6,29	6,59	0,14	60,58	0,58
56,49	1,18	7,74	6,61	0,12	64,92	0,70
63,65	1,19	9,19	6,63	0,10	67,37	0,79
66,74	1,27	9,67	6,64	0,10	68,30	0,83
78,30	1,27	11,12	6,66	0,09	71,20	0,97
89,86	1,28	11,60	6,67	0,07	73,46	1,12
92,47	1,32	13,05	6,69	0,07	73,86	1,15
103,21	1,32	14,01	6,71	0,06	75,43	1,28
102,56	1,32	14,01	6,71	0,07	75,34	1,28
102,40	1,32	14,50	6,71	0,07	75,30	1,27
102,23	1,32	14,50	6,71	0,07	75,28	1,27
101,91	1,32	14,01	6,71	0,07	75,25	1,27
101,74	1,32	14,01	6,71	0,07	75,23	1,27
101,74	1,32	14,50	6,71	0,07	75,21	1,27
101,58	1,32	14,01	6,71	0,07	75,21	1,26
101,58	1,32	14,50	6,71	0,07	75,19	1,26
101,42	1,32	14,50	6,71	0,07	75,17	1,26
102,40	1,32	14,50	6,71	0,07	75,30	1,27
101,42	1,32	14,50	6,71	0,07	75,17	1,26
101,58	1,32	14,50	6,71	0,07	75,19	1,26
101,74	1,32	14,50	6,71	0,07	75,21	1,27
109,23	1,32	14,98	6,72	0,06	76,17	1,36
114,12	1,46	18,36	6,78	0,06	76,64	1,42

117,21	1,52	21,26	6,82	0,06	76,90	1,46
130,72	1,61	22,71	6,84	0,05	78,17	1,63
147,65	1,75	27,06	6,91	0,05	79,40	1,84
145,70	1,84	31,41	6,98	0,05	79,15	1,81
164,58	1,99	32,86	7,00	0,04	80,34	2,05
185,09	2,22	38,66	7,09	0,04	81,29	2,30
182,65	2,31	43,50	7,17	0,04	81,08	2,27
202,67	2,46	44,95	7,19	0,04	81,92	2,52
213,09	2,66	51,71	7,30	0,03	82,20	2,65
220,91	2,67	51,23	7,29	0,03	82,48	2,75
237,51	2,86	57,03	7,38	0,03	82,92	2,95
235,40	2,86	57,03	7,38	0,03	82,85	2,93
233,93	2,84	57,03	7,38	0,03	82,81	2,91
232,79	2,84	57,03	7,38	0,03	82,77	2,90
241,09	2,93	59,45	7,42	0,03	82,99	3,00
246,14	3,01	60,42	7,43	0,03	83,11	3,06
246,95	3,05	62,35	7,46	0,03	83,11	3,07
253,79	3,07	63,80	7,48	0,03	83,27	3,16
252,16	3,10	66,22	7,52	0,03	83,20	3,14
264,37	3,19	69,12	7,57	0,03	83,47	3,29
269,26	3,29	75,41	7,67	0,03	83,50	3,35
276,58	3,33	76,85	7,69	0,03	83,66	3,44
290,09	3,48	84,11	7,80	0,03	83,86	3,61
286,84	3,48	85,56	7,82	0,03	83,77	3,57
298,23	3,62	90,88	7,91	0,03	83,95	3,71
296,28	3,66	98,13	8,02	0,03	83,82	3,69
307,02	3,71	101,03	8,06	0,03	84,00	3,82
309,30	3,78	106,84	8,16	0,03	83,98	3,85
314,02	3,82	108,77	8,19	0,03	84,05	3,91
322,00	3,89	114,09	8,27	0,03	84,14	4,00
326,07	4,01	123,28	8,41	0,03	84,11	4,06
327,37	4,08	127,63	8,48	0,03	84,08	4,07
332,58	4,12	129,57	8,51	0,03	84,16	4,14
328,51	4,08	130,53	8,53	0,03	84,07	4,09
325,42	4,08	130,05	8,52	0,03	84,02	4,05
338,77	4,15	134,88	8,59	0,03	84,21	4,21
333,72	4,13	136,34	8,62	0,03	84,10	4,15
330,63	4,11	136,34	8,62	0,03	84,05	4,11
327,70	4,09	136,34	8,62	0,03	84,00	4,08
340,56	4,22	141,66	8,70	0,03	84,17	4,24
336,49	4,21	142,63	8,71	0,03	84,09	4,19
339,91	4,28	150,36	8,83	0,03	84,06	4,23
343,81	4,30	154,72	8,90	0,03	84,09	4,28
341,53	4,37	166,81	9,09	0,03	83,92	4,25
348,70	4,44	175,03	9,22	0,03	83,96	4,34

354,07	4,55	190,02	9,45	0,03	83,90	4,40
350,33	4,58	195,34	9,54	0,03	83,79	4,36
353,58	4,66	207,92	9,73	0,03	83,72	4,40
353,26	4,70	213,24	9,82	0,03	83,66	4,39
364,98	4,91	238,40	10,21	0,03	83,62	4,54
355,53	4,96	244,21	10,30	0,03	83,39	4,42
363,02	5,21	268,88	10,68	0,03	83,29	4,52
357,98	5,21	273,72	10,76	0,03	83,14	4,45
366,12	5,43	294,52	11,08	0,03	83,10	4,55
360,91	5,52	311,46	11,35	0,03	82,83	4,49
364,65	5,68	320,66	11,49	0,03	82,82	4,54
372,79	5,85	345,82	11,88	0,03	82,73	4,64
362,37	5,98	350,17	11,95	0,03	82,48	4,51
371,49	6,15	369,53	12,25	0,03	82,48	4,62
362,37	6,18	372,92	12,31	0,03	82,26	4,51
371,98	6,39	391,31	12,59	0,03	82,29	4,63
364,65	6,42	393,25	12,62	0,03	82,12	4,54
378,00	6,59	408,74	12,87	0,03	82,25	4,70
367,74	6,66	411,64	12,91	0,04	82,01	4,57
376,37	6,81	423,74	13,10	0,03	82,07	4,68
368,88	6,83	425,68	13,13	0,04	81,90	4,59
366,44	6,85	426,65	13,15	0,04	81,83	4,56
365,14	6,85	427,13	13,15	0,04	81,80	4,54
364,16	6,85	427,13	13,15	0,04	81,78	4,53
363,35	6,83	427,61	13,16	0,04	81,76	4,52
362,70	6,85	427,61	13,16	0,04	81,74	4,51
375,72	6,97	433,90	13,26	0,04	81,97	4,67
370,67	6,98	436,32	13,30	0,04	81,83	4,61
368,56	6,99	437,29	13,31	0,04	81,78	4,58
371,00	7,03	439,71	13,35	0,04	81,81	4,61
369,05	7,03	440,68	13,36	0,04	81,76	4,59
367,74	7,04	441,17	13,37	0,04	81,72	4,57
370,02	7,07	444,07	13,42	0,04	81,75	4,60
371,98	7,11	446,01	13,45	0,04	81,77	4,63
369,53	7,11	447,46	13,47	0,04	81,70	4,60
368,23	7,14	447,94	13,48	0,04	81,67	4,58
367,09	7,13	448,43	13,49	0,04	81,64	4,57
366,12	7,13	448,43	13,49	0,04	81,62	4,55
372,30	7,17	450,85	13,52	0,04	81,73	4,63
372,30	7,43	462,47	13,70	0,04	81,62	4,63
374,09	7,58	480,86	13,99	0,04	81,49	4,65
367,42	7,63	483,28	14,03	0,04	81,32	4,57
372,79	7,81	498,29	14,26	0,04	81,30	4,64
373,28	9,14	585,44	15,62	0,04	80,50	4,64
365,30	9,22	587,38	15,65	0,04	80,27	4,54

372,63	9,37	599,97	15,85	0,04	80,34	4,63
359,93	9,52	602,88	15,90	0,04	79,98	4,48
366,60	9,76	616,44	16,11	0,04	80,03	4,56
355,21	9,86	626,12	16,26	0,05	79,63	4,42
353,91	10,11	628,55	16,30	0,05	79,56	4,40
363,67	10,31	638,72	16,45	0,05	79,74	4,52
346,91	10,40	638,23	16,45	0,05	79,26	4,31
348,21	10,64	645,50	16,56	0,05	79,23	4,33
340,40	10,77	652,76	16,67	0,05	78,91	4,23
338,77	11,02	650,34	16,64	0,05	78,89	4,21
344,63	11,17	656,64	16,73	0,05	79,01	4,29
336,16	11,25	658,58	16,76	0,05	78,72	4,18
338,28	11,42	662,94	16,83	0,05	78,74	4,21
336,49	11,46	664,87	16,86	0,05	78,67	4,19
333,56	11,48	664,39	16,86	0,05	78,57	4,15
336,16	11,49	664,39	16,86	0,05	78,66	4,18
330,95	11,47	664,39	16,86	0,05	78,49	4,12
331,77	11,50	666,33	16,89	0,05	78,49	4,13
327,53	11,51	665,85	16,88	0,05	78,35	4,07
328,84	11,50	666,82	16,89	0,05	78,39	4,09
325,09	11,50	667,30	16,90	0,05	78,25	4,04
322,49	11,49	666,81	16,89	0,05	78,17	4,01
320,70	11,50	666,33	16,89	0,05	78,11	3,99
319,40	11,48	666,33	16,89	0,05	78,06	3,97
318,42	11,48	665,85	16,88	0,05	78,03	3,96
317,60	11,46	665,85	16,88	0,05	78,00	3,95
316,79	11,48	666,33	16,89	0,05	77,96	3,94
316,30	11,47	665,37	16,87	0,05	77,96	3,93
315,98	11,47	665,85	16,88	0,05	77,94	3,93
315,33	11,47	665,37	16,87	0,05	77,92	3,92
315,00	11,47	665,37	16,87	0,05	77,91	3,92
314,67	11,46	665,37	16,87	0,05	77,90	3,91
314,35	11,48	664,40	16,86	0,05	77,89	3,91
314,19	11,48	664,40	16,86	0,05	77,89	3,91
313,86	11,46	664,40	16,86	0,05	77,88	3,90
313,53	11,46	664,40	16,86	0,05	77,86	3,90
313,37	11,48	664,40	16,86	0,05	77,86	3,90
313,21	11,46	664,40	16,86	0,05	77,85	3,90
312,88	11,48	663,91	16,85	0,05	77,84	3,89
312,72	11,46	663,91	16,85	0,05	77,84	3,89
312,56	11,48	663,91	16,85	0,05	77,83	3,89
312,72	11,47	664,88	16,86	0,05	77,83	3,89
318,42	11,50	664,88	16,86	0,05	78,04	3,96
317,93	11,49	664,40	16,86	0,05	78,03	3,95
317,77	11,50	664,40	16,86	0,05	78,02	3,95

317,12	11,50	663,91	16,85	0,05	78,00	3,94
316,63	11,48	664,40	16,86	0,05	77,98	3,94
316,47	11,50	663,91	16,85	0,05	77,98	3,94
315,98	11,48	664,88	16,86	0,05	77,95	3,93
315,49	11,48	663,91	16,85	0,05	77,94	3,92
315,00	11,49	664,40	16,86	0,05	77,92	3,92
316,30	11,48	664,88	16,86	0,05	77,96	3,93
315,81	11,48	665,36	16,87	0,05	77,94	3,93
315,49	11,46	665,36	16,87	0,05	77,93	3,92
315,16	11,47	664,88	16,86	0,05	77,92	3,92
314,84	11,50	664,88	16,86	0,05	77,91	3,92
314,51	11,47	664,40	16,86	0,05	77,90	3,91
314,35	11,49	664,40	16,86	0,05	77,89	3,91
314,02	11,47	664,88	16,86	0,05	77,88	3,91
315,00	11,47	664,40	16,86	0,05	77,92	3,92
314,84	11,48	664,88	16,86	0,05	77,91	3,92
314,51	11,49	664,88	16,86	0,05	77,90	3,91
314,35	11,48	663,92	16,85	0,05	77,90	3,91
314,02	11,48	663,92	16,85	0,05	77,89	3,91
313,86	11,49	664,40	16,86	0,05	77,88	3,90
313,53	11,49	664,40	16,86	0,05	77,86	3,90
313,37	11,49	664,40	16,86	0,05	77,86	3,90
313,21	11,49	663,92	16,85	0,05	77,86	3,90
312,88	11,49	663,92	16,85	0,05	77,84	3,89
312,88	11,49	663,92	16,85	0,05	77,84	3,89
312,56	11,48	663,91	16,85	0,05	77,83	3,89
312,56	11,49	663,92	16,85	0,05	77,83	3,89
312,40	11,48	663,92	16,85	0,05	77,83	3,89
312,23	11,48	663,91	16,85	0,05	77,82	3,88
312,07	11,49	663,43	16,84	0,05	77,82	3,88
311,91	11,48	663,43	16,84	0,05	77,81	3,88
311,74	11,49	664,40	16,86	0,05	77,80	3,88
311,58	11,49	663,43	16,84	0,05	77,80	3,88
311,42	11,48	663,92	16,85	0,05	77,79	3,87
311,42	11,49	663,43	16,84	0,05	77,79	3,87
311,26	11,48	663,92	16,85	0,05	77,78	3,87
311,09	11,46	663,43	16,84	0,05	77,78	3,87
313,86	11,51	663,43	16,84	0,05	77,89	3,90
314,02	11,52	664,40	16,86	0,05	77,88	3,91
317,93	11,55	664,40	16,86	0,05	78,03	3,95
320,86	11,58	664,88	16,86	0,05	78,13	3,99
319,40	11,58	665,85	16,88	0,05	78,07	3,97
320,70	11,60	665,85	16,88	0,05	78,11	3,99
321,19	11,59	667,30	16,90	0,05	78,11	3,99
319,07	11,57	667,79	16,91	0,05	78,03	3,97

320,21	11,59	668,27	16,92	0,05	78,07	3,98
320,70	11,61	669,24	16,93	0,05	78,08	3,99
316,79	11,63	669,73	16,94	0,05	77,93	3,94
317,93	11,64	669,73	16,94	0,05	77,97	3,95
314,51	11,63	669,24	16,93	0,05	77,85	3,91
311,74	11,63	668,76	16,92	0,05	77,75	3,88
311,74	11,64	668,76	16,92	0,05	77,75	3,88
311,91	11,63	668,76	16,92	0,05	77,76	3,88
310,28	11,63	668,27	16,92	0,05	77,70	3,86
309,95	11,63	668,27	16,92	0,05	77,69	3,86
308,00	11,62	667,79	16,91	0,05	77,62	3,83
305,23	11,61	666,82	16,89	0,06	77,52	3,80
302,95	11,62	667,79	16,91	0,06	77,42	3,77
303,77	11,58	666,82	16,89	0,06	77,46	3,78
305,07	11,59	666,82	16,89	0,06	77,51	3,79
303,60	11,58	666,82	16,89	0,06	77,45	3,78
303,77	11,57	666,82	16,89	0,06	77,46	3,78
302,30	11,57	666,34	16,89	0,06	77,41	3,76
300,35	11,57	665,85	16,88	0,06	77,33	3,74

Corpo de prova CP.4.NSP:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Extensão média ($\mu\epsilon$)	Pré - esforço (kN)	Ned (tirante) kN)	μ	θ (°)	TAU
0,01	0,00	0,00	6,49	6,49	648,86	0,02	0,00
7,00	0,18	5,45	6,49	6,57	0,94	14,91	0,09
28,81	0,56	11,21	6,49	6,66	0,23	47,23	0,36
43,63	0,76	15,93	6,49	6,74	0,15	58,30	0,54
55,51	0,97	20,25	6,49	6,80	0,12	63,88	0,69
65,60	1,13	23,73	6,49	6,86	0,10	67,30	0,82
78,95	1,23	26,29	6,49	6,90	0,09	70,73	0,98
97,19	1,41	28,38	6,49	6,93	0,07	74,08	1,21
115,26	1,62	30,84	6,49	6,97	0,06	76,40	1,43
133,00	1,83	34,25	6,49	7,02	0,05	78,07	1,65
150,42	2,05	37,21	6,49	7,07	0,05	79,35	1,87
155,79	2,19	42,05	6,49	7,14	0,05	79,60	1,94
165,72	2,25	43,98	6,49	7,17	0,04	80,18	2,06
182,33	2,44	46,89	6,49	7,22	0,04	81,00	2,27
196,49	2,59	51,24	6,49	7,29	0,04	81,56	2,44
197,95	2,62	51,72	6,49	7,30	0,04	81,61	2,46
203,33	2,71	55,59	6,49	7,36	0,04	81,77	2,53
210,65	2,76	56,07	6,49	7,36	0,03	82,04	2,62
225,79	2,90	60,42	6,49	7,43	0,03	82,50	2,81

224,81	2,92	60,90	6,49	7,44	0,03	82,46	2,80
224,33	2,94	60,90	6,49	7,44	0,03	82,44	2,79
224,00	2,92	60,90	6,49	7,44	0,03	82,43	2,79
223,84	2,92	61,39	6,49	7,45	0,03	82,42	2,78
223,02	2,95	61,87	6,49	7,45	0,03	82,39	2,77
223,02	2,95	62,36	6,49	7,46	0,03	82,38	2,77
222,86	2,93	61,87	6,49	7,45	0,03	82,38	2,77
225,37	3,02	60,12	6,49	7,43	0,03	82,49	2,80
228,61	3,07	62,38	6,49	7,46	0,03	82,56	2,84
230,45	3,16	64,25	6,49	7,49	0,03	82,59	2,87
232,68	3,20	68,12	6,49	7,55	0,03	82,60	2,89
235,71	3,25	70,47	6,49	7,59	0,03	82,66	2,93
238,37	3,37	72,31	6,49	7,62	0,03	82,72	2,96
240,44	3,44	73,78	6,49	7,64	0,03	82,76	2,99
263,21	3,62	78,27	6,49	7,71	0,03	83,32	3,27
284,30	3,85	86,32	6,49	7,84	0,03	83,71	3,54
291,45	3,91	92,75	6,49	7,94	0,03	83,78	3,63
298,43	4,03	101,12	6,49	8,07	0,03	83,83	3,71
305,78	4,22	107,56	6,49	8,17	0,03	83,90	3,80
315,85	4,38	115,24	6,49	8,29	0,03	84,01	3,93
332,28	4,56	128,17	6,49	8,49	0,03	84,17	4,13
342,72	4,70	157,82	6,49	8,95	0,03	84,04	4,26
358,34	4,85	199,95	6,49	9,61	0,03	83,88	4,46
362,57	4,98	203,20	6,49	9,66	0,03	83,92	4,51
375,72	5,14	204,52	6,49	9,68	0,03	84,12	4,67
381,26	5,36	225,31	6,49	10,00	0,03	84,01	4,74
382,72	5,47	236,44	6,49	10,18	0,03	83,93	4,76
383,37	5,56	244,18	6,49	10,30	0,03	83,87	4,77
384,84	5,63	251,43	6,49	10,41	0,03	83,82	4,79
385,65	5,68	257,71	6,49	10,51	0,03	83,78	4,80
386,30	5,72	264,49	6,49	10,62	0,03	83,73	4,80
386,30	5,77	272,71	6,49	10,74	0,03	83,65	4,80
386,14	5,82	280,45	6,49	10,86	0,03	83,58	4,80
387,44	5,90	291,09	6,49	11,03	0,03	83,50	4,82
386,63	6,02	299,31	6,49	11,16	0,03	83,41	4,81
392,49	6,17	312,37	6,49	11,36	0,03	83,39	4,88
385,49	6,22	321,08	6,49	11,50	0,03	83,20	4,79
387,77	6,37	332,20	6,49	11,67	0,03	83,13	4,82
392,98	6,49	345,75	6,49	11,88	0,03	83,10	4,89
385,49	6,64	363,65	6,49	12,16	0,03	82,81	4,79
383,70	6,85	380,58	6,49	12,43	0,03	82,62	4,77
382,56	7,12	401,38	6,49	12,75	0,03	82,41	4,76
382,23	7,43	431,86	6,49	13,23	0,03	82,12	4,75
379,95	7,85	467,67	6,49	13,79	0,04	81,74	4,73
372,95	8,20	493,80	6,49	14,19	0,04	81,34	4,64

372,47	8,64	516,55	6,49	14,55	0,04	81,12	4,63
366,60	9,07	546,56	6,49	15,02	0,04	80,69	4,56
360,09	9,82	573,66	6,49	15,44	0,04	80,27	4,48
348,86	10,73	596,41	6,49	15,79	0,05	79,74	4,34
340,23	11,84	618,18	6,49	16,13	0,05	79,26	4,23

