



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

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

(versão final após defesa pública)

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

Covilhã, Junho de 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, concluiu-se sobre a investigação realizada, e propõem-se pontos de partida para investigações futuras.

Palavras chave:

lajes mistas; interface aço-betão; resistência ao corte longitudinal

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 was 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.

Keywords

composite slabs; interface steel-concrete; longitudinal shear resistance

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Enquadramento histórico do tema.....	1
1.3	Objeto de estudo.....	2
1.4	Objetivos	5
1.5	Organização do trabalho.....	6
2	Revisão bibliográfica	7
2.1	Composição e comportamento	7
2.1.1	Ligação aço-betão.....	7
2.1.2	Forças na interface aço-betão	8
2.1.3	Interface aço-betão.....	9
2.1.4	Formas de conexão	11
2.1.5	A conexão mecânica e o mecanismo de rotura	13
2.1.6	Análise paramétrica da interface aço-betão	14
2.2	Determinação do esforço de corte longitudinal resistente.....	18
2.2.1	Método “m-k”	18
2.2.2	Método da tensão τ_u ou da conexão parcial	20
2.2.3	Ensaio de escorregamento.....	24
2.2.4	Ensaio de arranque	25
2.2.5	Método das forças de equilíbrio	27
2.2.6	Método de elementos finitos.....	30
2.3	Ações.....	31
3	Metodologia.....	33
3.1	Objetivo da metodologia proposta	33
3.2	Princípios gerais da metodologia	33
3.2.1	Método de elementos finitos.....	33
3.2.2	Modelo de escoras e tirantes	34
3.2.3	Método experimental.....	36
3.3	Procedimento geral da metodologia	37
4	Análise numérica	39
4.1	Modelação de perfis.....	39
4.2	Análise de tensões.....	41
4.2.1	Secção Trapezoidal	41
4.2.2	Secção Reentrante.....	44
4.2.3	Secção Retangular	48
4.2.4	Análise dos resultados.....	52

4.3	Direções principais de tensão	53
4.4	Modelo de escoras e tirantes	55
4.5	Caminho de carga	58
4.6	Aplicação com modelo de escora e tirantes	59
4.7	Proposta de nova solução	62
5	Metodologia Experimental	65
5.1	Construção de provetes	65
5.2	Condições de ensaio.....	67
5.3	Preparação dos ensaios laboratoriais	68
5.4	Primeira fase de ensaios laboratoriais.....	69
5.4.1	Montagem laboratorial	69
5.4.2	Procedimento experimental	70
5.4.3	Realização dos ensaios	71
5.4.4	Análise de dados recolhidos.....	73
5.5	Segunda fase de ensaios laboratoriais.....	75
5.5.1	Montagem laboratorial	75
5.5.2	Procedimento experimental.....	76
5.5.3	Realização dos ensaios	76
5.5.4	Análise de dados recolhidos.....	79
5.6	Métodos de rotura dos corpos de prova	81
5.7	Análise da rotura dos corpos de prova.....	81
6	Considerações finais	87
6.1	Principais conclusões	87
6.2	Trabalhos Futuros	89
	Bibliografia.....	91
A	Anexos	95
A.1	Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio.....	95
A.2	Montagem laboratorial - primeira fase de ensaios.....	97
A.3	Registo fotográfico - primeira fase de ensaios	109
A.4	Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios	111
A.5	Montagem laboratorial - segunda fase de ensaios.....	131
A.6	Registo fotográfico - segunda fase de ensaios.....	143
A.7	Informação técnica recolhida - segunda fase de ensaios.....	145

Lista de Figuras

Figura 1 - Rotura por corte longitudinal na interface aço-betão (adaptado de [3])	2
Figura 2 - Tipos de chapas perfiladas (adaptado de [2][1])	3
Figura 3 - Inclinação de almas das secções tipo.....	4
Figura 4- Chapa perfilada HAIRCOL 59s (adaptado de [31]).....	4
Figura 5 - Chapa perfilada Cofraplus 60 (adaptado de [32])	5
Figura 6 - Chapa perfilada ComFlor 51 (adaptado de [33])	5
Figura 7 - Influência do grau de conexão (adaptado de [5])	7
Figura 8 - Influência do grau de interação (adaptado de [5]).....	8
Figura 9 - Diagramas de tensão normal (esquerda) e tangencial (direita) para secções mistas com interação total e nula (adaptado de [25]).....	8
Figura 10 - Rotura por corte longitudinal - interface após ensaio de flexão (adaptado de [17])	10
Figura 11 - Esquema do mecanismo de resistência ao corte longitudinal (adaptado de [17]) .	10
Figura 12 - Exemplo de separação vertical (adaptado de [25])	11
Figura 13 - Tipos de conectores (adaptado de [5])	12
Figura 14 - Ensaio de flexão, gráfico de Carga vs Escorregamento (adaptado de [11])	13
Figura 15 - Fissuração em ensaios de flexão (adaptado de [10]).....	14
Figura 16 - Mapas de tensões para bossas com relevo positivo, a), e negativo, b), (adaptado de [17])	15
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 de [17])	17
Figura 18 - Curvas tipo do comportamento da conexão (adaptado de [5]).....	19
Figura 19 - Tratamento de resultados método "m-k" (adaptado de [2])	20
Figura 20 - Curva de interação e processo de determinação do grau de conexão, η (adaptado de [2]).....	21
Figura 21 - Decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado de [5])	23

Figura 22 - Nova decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado de [10]).....	23
Figura 23 - Ensaio de escorregamento (adaptado de [25])	24
Figura 24 - Resultados do ensaio de escorregamento (adaptado de [25])	25
Figura 25 - Corpo de prova para ensaios de arrancamento (adaptado de [14])	26
Figura 26 - Resultado típico de ensaios de arrancamento (adaptado de [14]).....	27
Figura 27 - Ensaio de flexão em uma nervura de laje mista (adaptado de [19])	28
Figura 28 - Fissuração da laje ensaiada (a); Deslocamentos e curvatura da laje ensaiada (b) (adaptado de [18]).....	28
Figura 29 - Diagrama de corpo livre da laje (a); Diagrama de extensões (b); Diagrama de tensões e esforços internos (c) (adaptado de [18])	28
Figura 30 - Comportamento $\sigma - \epsilon$ dos materiais: a) chapa perfilada; b) rede electrosoldada; c) betão (adaptado de [14]).....	30
Figura 31 - Modelo analítico da interface aço-betão (adaptado de [6])	31
Figura 32 - Representação da fragmentação de um elemento contínuo (adaptado de [28])...	34
Figura 33 - Exemplo da fração de chapa perfilada a utilizar nos ensaios de arranque.....	36
Figura 34 - Desenho esquemático dos corpos de prova (secção transversal)	37
Figura 35 - Chapa perfilada H60	39
Figura 36 - Secção retangular em estudo.....	39
Figura 37 - Secção reentrante em estudo	40
Figura 38 - Malha de EF de cálculo	40
Figura 39 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal).....	41
Figura 40 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Trapezoidal)	42
Figura 41 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Trapezoidal)	42
Figura 42 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Trapezoidal)	43
Figura 43 - Tensões transversais, τ_{xy} , na interface aço- betão (Secção Trapezoidal)	43
Figura 44 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Trapezoidal).....	44
Figura 45 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal).....	44
Figura 46 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)	45
Figura 47 - Tensões, σ_{xx} , no betão (Secção Reentrante).....	45

Figura 48 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Reentrante)	46
Figura 49 -Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Reentrante).....	46
Figura 50 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Reentrante).....	47
Figura 51 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Reentrante)	47
Figura 52 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)	48
Figura 53 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Retangular)	48
Figura 54 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Retangular)	49
Figura 55 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Retangular).....	50
Figura 56 - Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Retangular).....	50
Figura 57 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Retangular)	51
Figura 58 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Retangular)	51
Figura 59 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Retangular)	52
Figura 60 - Representação em planta dos eixos principais	54
Figura 61 - Representação em corte transversal dos eixos principais.....	54
Figura 62 - Representação em alçado dos eixos principais.....	55
Figura 63 - Representação tridimensional dos eixos principais.....	55
Figura 64 - Inclinação das escoras e tirantes da treliça de betão.....	56
Figura 65 - Alçado do modelo de escoras e tirantes.....	56
Figura 66 - Planta do modelo de escoras e tirantes	56
Figura 67 - Corte do modelo de escoras e tirantes	57
Figura 68 - Modelo virtual de escoras e tirantes	58
Figura 69 - Modelo físico de escoras e tirantes.....	58
Figura 70 - Caminho de carga (Secção Trapezoidal).....	59
Figura 71 - Modelo de escora e tirantes contruído no software	59
Figura 72 - Esforços na treliça de betão	60
Figura 73 - Escoras de ligação entre os materiais.....	60
Figura 74 - Trações nos banzos da chapa perfilada.....	61
Figura 75 - Trações transversais no banzo inferior e almas da chapa perfilada.....	61

Figura 76 - Adaptação do STM à secção reentrante	62
Figura 77 - Distribuição antissimétrica de bossas - chapa perfilada H60	63
Figura 78 - Solução proposta - Alçado da alma da chapa	64
Figura 79 - Soldadura dos corpos de prova para a secção H60	65
Figura 80 - Soldadura dos corpos de prova para a nova solução proposta	65
Figura 81 - Corpos de prova após construção da parte metálica	66
Figura 82 - Rebarbagem de varões	66
Figura 83 - Provede construído com solução proposta	66
Figura 84 - Cura dos provedes	67
Figura 86 - Imagem tridimensional - vista superior	68
Figura 85 - Imagem tridimensional - vista inferior	68
Figura 87 - Remoção de chapa de cofragem	68
Figura 88 - Corpo de prova pronto para ensaio	68
Figura 89 - Descofragem de corpos de prova	68
Figura 90 - Esquema da estrutura selecionada	69
Figura 91 - Fotografia da estrutura selecionada	69
Figura 92 - Montagem Laboratorial - primeira fase de ensaios	70
Figura 93 - Primeira fissura (50 kN $\delta=0,12\text{mm}$) - CP.1.H60	71
Figura 94 - Corpo de prova após rotura (128 kN $\delta=11,86\text{mm}$) - CP.1.H60	72
Figura 95 - Interface no aço - CP.1.H60 após rotura	73
Figura 96 - Interface no betão - CP.1.H60 após rotura	73
Figura 97 - Vista superior - CP.1.H60 após rotura	73
Figura 98 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.2.H60	74
Figura 99 - Face da chapa após rotura - CP.2.H60	74
Figura 100 - Montagem Laboratorial - segunda fase de ensaios	76
Figura 101 - Primeira fissura (50 kN $\delta=1,18\text{mm}$) - CP.3.NSP	77
Figura 102 - Corpo de prova após rotura (372 kN $\delta=5,85\text{mm}$) - CP.3.NSP	78
Figura 103 - Vista superior - CP.3.NSP após rotura	79
Figura 104 - Interface no aço -	79
Figura 105 - Interface no betão - CP.3.NSP após rotura	79

Figura 106 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.4.NSP	80
Figura 107 - Face da chapa após ensaio - CP.4.NSP	80
Figura 108- Modelo de escoras e tirantes do ensaio.....	82
Figura 109 - Gráfico deslocamento relativo - força atuante / tensão tangencial τ	85

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coeficientes de redução η_1 e η_2 propostos (adaptado de [10]).....	24
Tabela 2 - Características dos corpos de prova.....	67

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

Caracteres latinos maiúsculos:

A_p - área de aço da chapa perfilada

I - inércia da secção homogeneizada

L - vão

L_s - vão de corte

M_{Ed} - Momento fletor atuante

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

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

M_{Rd} - Momento fletor resistente

N_c - força de compressão atuante no betão

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

N_{pa} - resistência à tração da chapa perfilada

P_i - carga aplicada no instante i

S - momento estático da secção homogeneizada

V_{Ed} - Esforço de Corte transversal atuante

V_{Ed} - Esforço de Corte longitudinal atuante

V_{Rd} - Esforço de Corte longitudinal resistente

V_{Rd} - Esforço de Corte transversal resistente

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

W_t - Carga de rotura espectável

Caracteres latinos minúsculos:

b - largura da secção transversal

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

e - eixo neutro elástico da área efetiva da chapa perfilada

e.n. - eixo neutro

e_p - eixo neutro plástico da área efetiva da chapa perfilada

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

h - espessura da laje mista

$q(x)$ - fluxo de corte longitudinal

s_i - escorregamento no topo da nervura no instante i

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

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

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

Caracteres gregos minúsculos:

μ - Coeficiente de atrito

η - grau de conexão

τ_u - tensão de corte longitudinal

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 mistas 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 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 apresentam escorregamento relativo (visível no topo do vão) (Figura 1) e, conseqüentemente, 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].

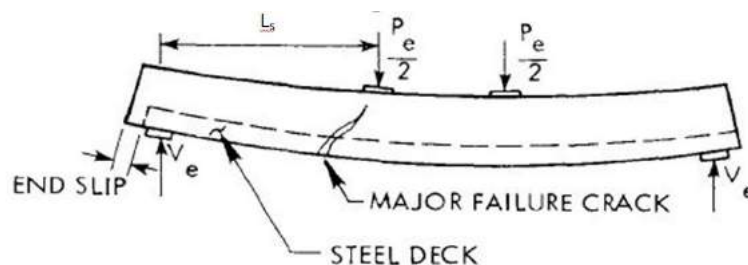


Figura 1 - Rotura por corte longitudinal na interface aço-betão (adaptado de [3])

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.

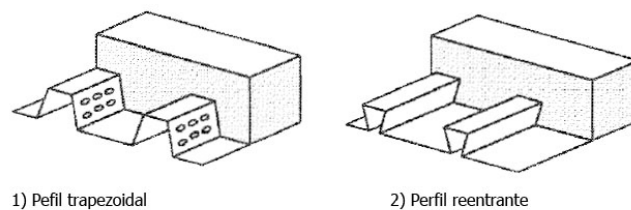


Figura 2 - Tipos de chapas perfiladas (adaptado de [2][1])

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]:

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

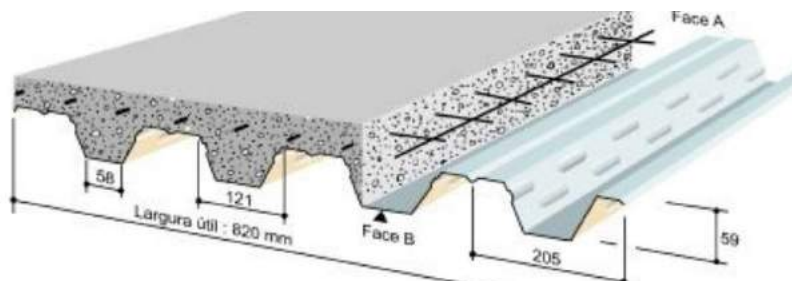


Figura 4- Chapa perfilada HAIRCOL 59s (adaptado de [31])

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].

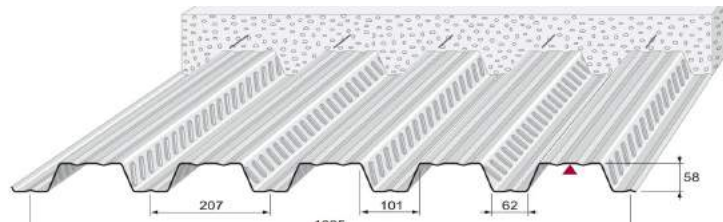


Figura 5 - Chapa perfilada Cofraplus 60 (adaptado de [32])

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

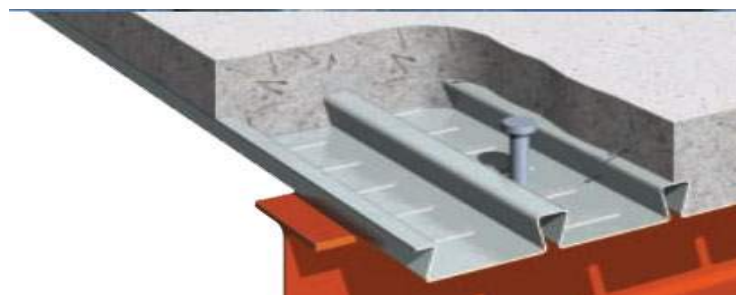


Figura 6 - Chapa perfilada ComFlor 51 (adaptado de [33])

1.4 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. Foram 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 foram ensaiados, pretendendo-se comprovar a viabilidade da solução proposta.

1.5 Organização do trabalho

O trabalho de investigação divide-se 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 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 garante 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 de corte longitudinal resistente da interface, (Figura 7).
- A interação caracteriza o elemento estrutural quanto ao deslocamento entre os materiais aço perfílado e betão, sendo esta, dependente rigidez da conexão, (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.

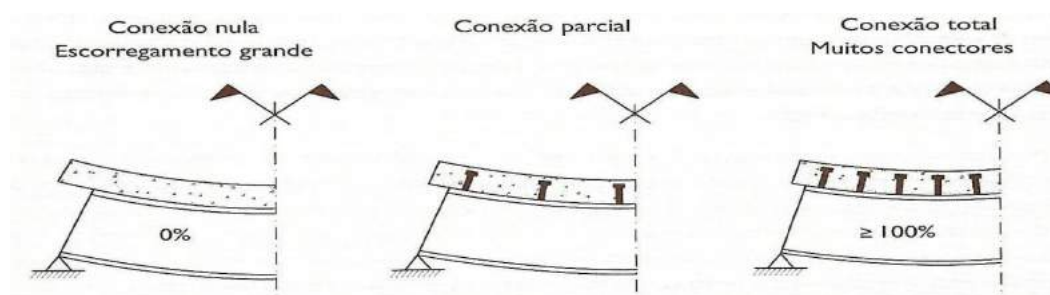


Figura 7 - Influência do grau de conexão (adaptado de [5])

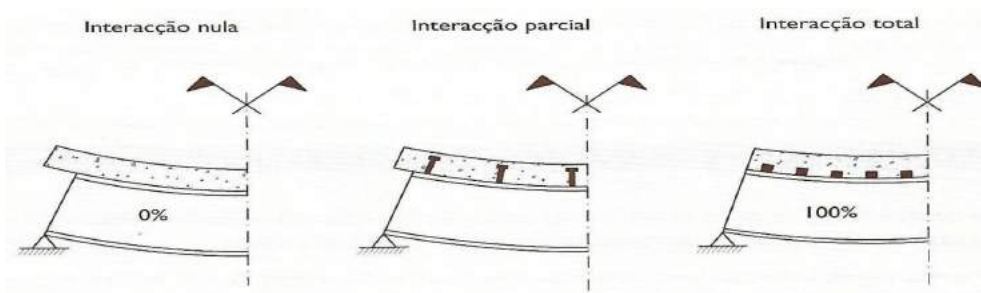


Figura 8 - Influência do grau de interação (adaptado de [5])

2.1.2 Forças na interface aço-betão

Num 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.

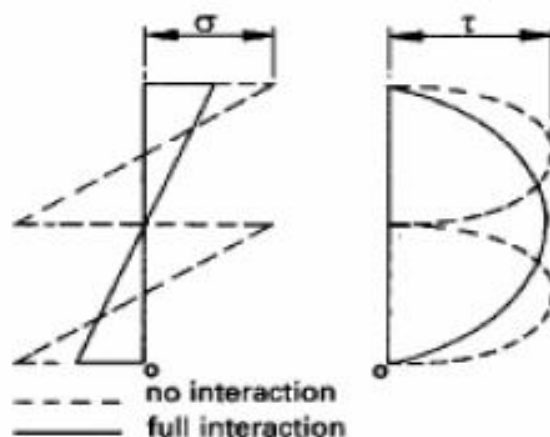


Figura 9 - Diagramas de tensão normal (esquerda) e tangencial (direita) para seções mistas com interação total e nula (adaptado de [25])

Verificando o comportamento solidário na secção, o grau de conexão é elevado e consequentemente 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 expressão (1) [20][21]:

$$q(x) = \frac{V(x) \cdot S}{I} \quad (1)$$

em que:

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

- S é o momento estático da parte superior ou inferior da secção homogeneizada em relação ao eixo neutro (e.n.) elástico;
- I é a inércia da secção homogeneizada.

A expressão (1) mostra 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].

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 mistas 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.

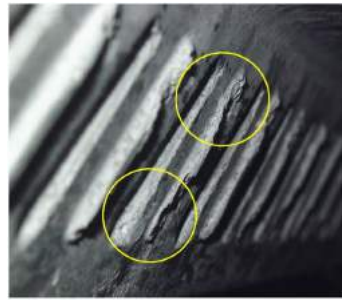


Figura 10 - Rotura por corte longitudinal - interface após ensaio de flexão (adaptado de [17])

A função das bossas é idêntica à função das corrugações do aço estrutural utilizadas 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].

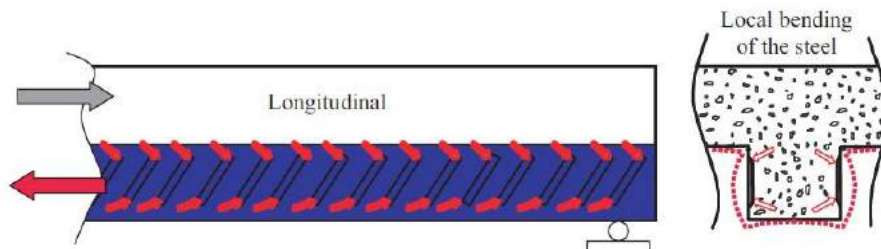


Figura 11 - Esquema do mecanismo de resistência ao corte longitudinal (adaptado de [17])

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.

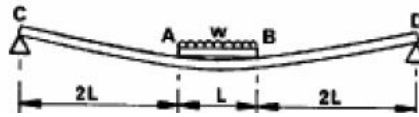


Figura 12 - Exemplo de separação vertical (adaptado de [25])

Analogamente ao fenómeno descrito no exemplo de duas vigas, os materiais das lajes mistas solicitadas à flexão também tendem a separar-se, pois a secção de 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 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.

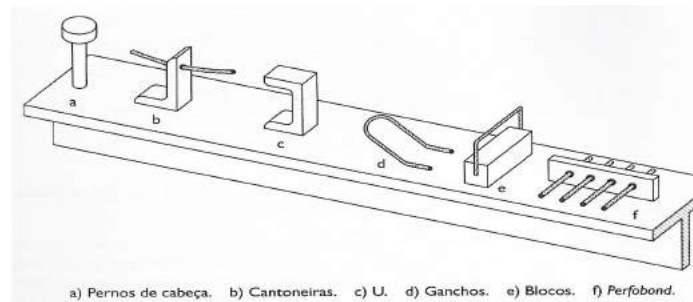


Figura 13 - Tipos de conectores (adaptado de [5])

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, [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 de compressão, deforma-se, encurtando segundo o eixo solicitado e expandindo-se segundo os eixos ortogonais. Este efeito gera forças friccionalis, 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].

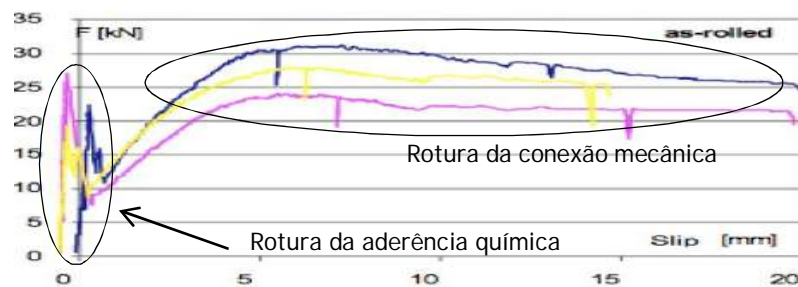


Figura 14 - Ensaio de flexão, gráfico de Carga vs Escorregamento (adaptado de [11])

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 rugosidade da chapa perfilada. Assim, quanto maior for este parâmetro,

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].

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 15), levando ao escorregamento perceptível nas extremidades do corpo de prova [10].

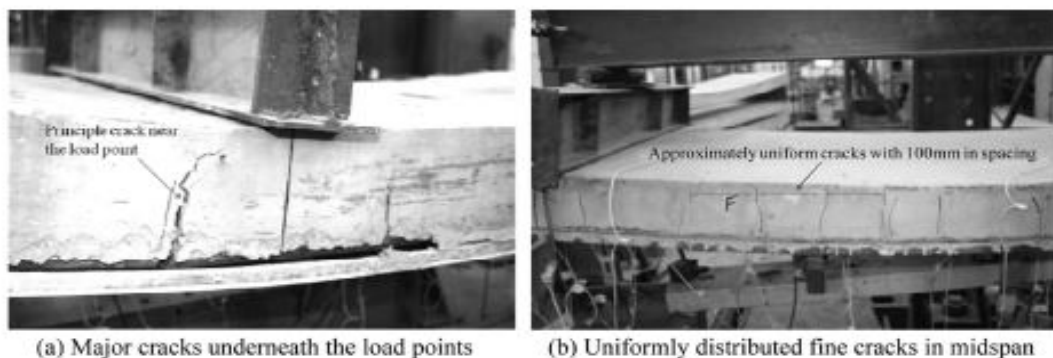


Figura 15 - Fissuração em ensaios de flexão (adaptado de [10])

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 fatura 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

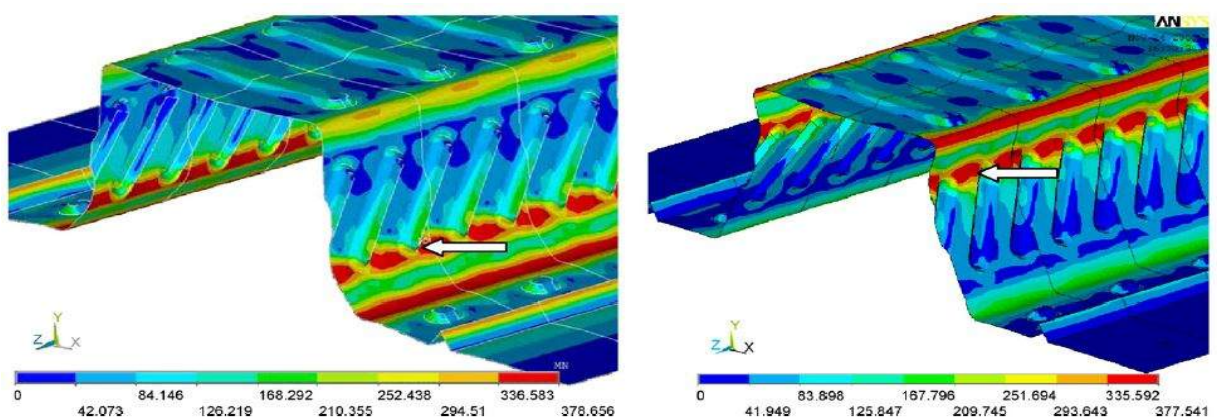


Figura 16 - Mapas de tensões para bossas com relevo positivo, a), e negativo, b), (adaptado de [17])

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 ao elemento. Existe ainda uma outra variável que interfere neste processo: a capacidade dos equipamentos industriais do fabricante.

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 ao corte longitudinal 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].

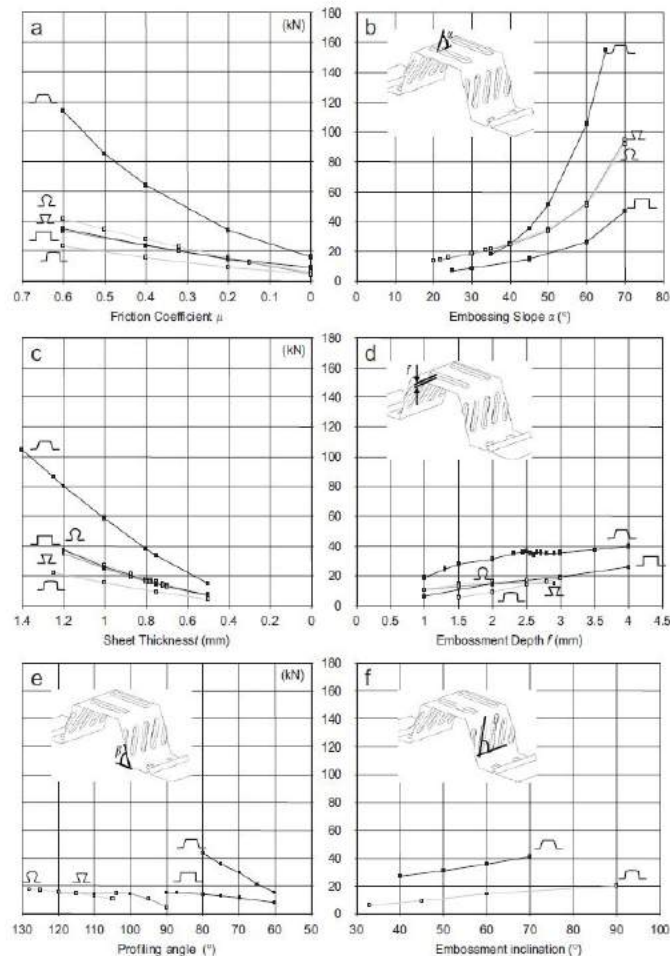


Figura 17 - Influencia de: coeficiente de atrito, μ (a), declive da bossa (b), espessura do perfil (c), espessura da bossa (d), ângulo do perfil (e) e inclinação da bossa (f) na resistência ao corte longitudinal (kN) (adaptado de [17])

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 (Figura 17a). A espessura do perfil relaciona-se quadraticamente com a 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.

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 $0,4W_t$.

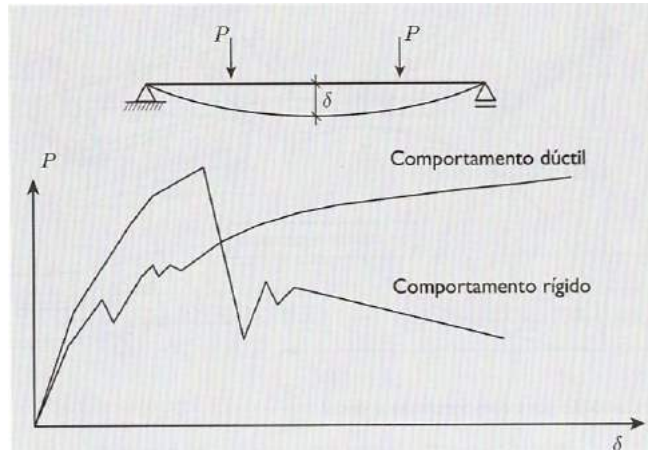


Figura 18 - Curvas tipo do comportamento da conexão (adaptado de [5])

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 (2) e determina-se o esforço de corte resistente da conexão dividido por um coeficiente parcial de segurança, $\gamma_{vs} = 1,25$.

$$V_{l,Rd} = \frac{b d_p}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m A_p}{b L_s} + k \right) \quad (2)$$

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]:

- 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.
- 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.
- O método de avaliação é igual para conexão frágil ou dúctil, apesar da redução de 20% da capacidade resistente para lajes com conexão rígida.

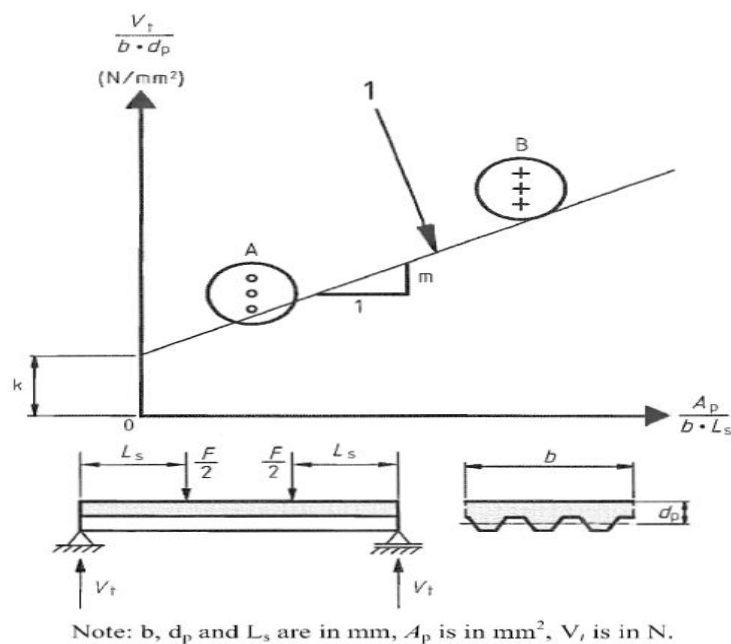


Figura 19 - Tratamento de resultados método "m-k" (adaptado de [2])

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). O grau de conexão, η , é determinado pela relação entre o momento fletor da laje ensaiada e o momento plástico resistente da secção (Figura 20).

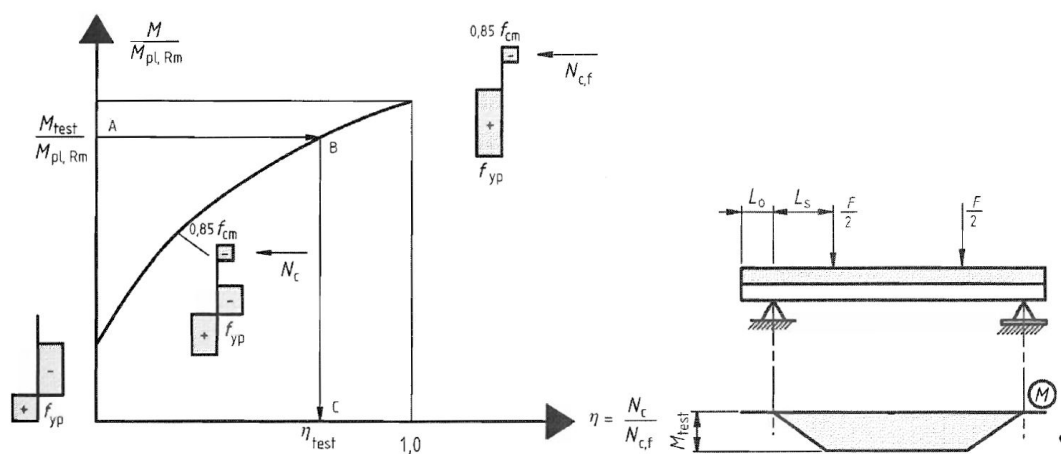


Figura 20 - Curva de interação e processo de determinação do grau de conexão, η (adaptado de [2])
Após a quantificação do grau de conexão, η , é possível determinar a força de compressão no betão, N_c , pela expressão (3).

$$\eta = \frac{N_c}{N_{cf}} \quad (3)$$

em que:

- N_{cf} 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):

$$\tau_{u,Rd} = \frac{\eta N_{cf} + \mu V_t}{b(L_s + L_0)} \quad (4)$$

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 reação 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.

$$L_{sf} = \frac{N_{cf}}{b \tau_{u,Rd}} \quad (5)$$

Posteriormente determina-se a posição do eixo neutro plástico do betão pela expressão (6).

$$z_{pl,c} = \frac{N_c}{0,85 f_{cd} b} \leq h_c \quad (6)$$

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 (Figura 21) [1],

$$M_{Rd} = N_c z + M_{pr} \quad (7)$$

com: $M_{pr} = 1,25 M_{pa} \left(1 - \frac{N_c}{N_{pa}} \right) \leq M_{pa}$ e $z = h - \frac{z_{pl,c}}{2} - e_p + (e_p - e) \frac{N_c}{N_{pa}}$

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 tração 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 efetiva da chapa perfilada;
- e é o eixo neutro elástico da área efetiva da chapa perfilada.

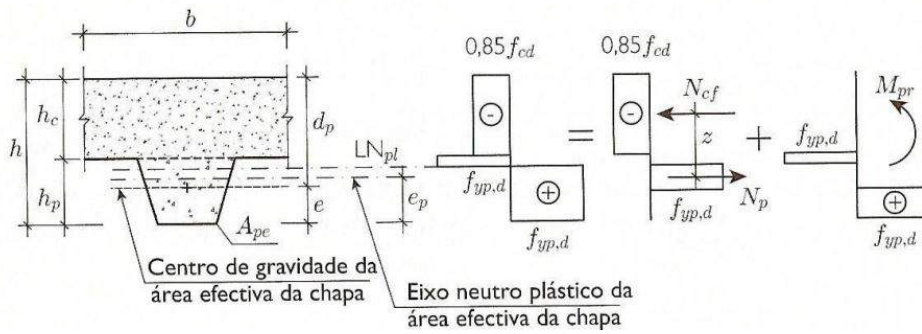


Figura 21 - Decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado de [5])
 A aplicação deste método revela que para soluções com grau de conexão, η , inferior a 0,4 a tensão última de corte, τ_u , determinada pelo método, é superior à que se verifica nos corpos de prova. Neste 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).

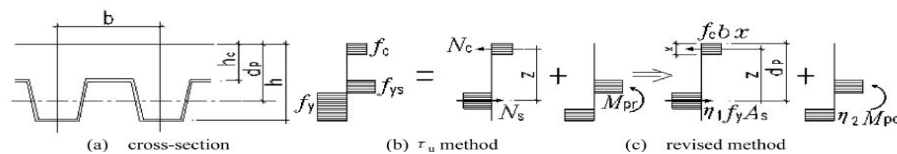


Figura 22 - Nova decomposição do diagrama de flexão composta em comportamento plástico (adaptado de [10])

O momento resistente da secção tendo em conta a rotura por corte longitudinal é agora determinado pela expressão (8).

$$M_{Rd} = \eta_1 f_y A_s z / \gamma_{ap} + \eta_2 M_{pa} \quad (8)$$

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

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 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) [1][2].

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 Tabela 1.

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.

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	

Tabela 1 - Coeficientes de redução η_1 e η_2 propostos (adaptado de [10])

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 Ensaios 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 300 mm 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 23.

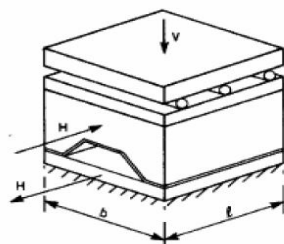


Figura 23 - Ensaios de escorregamento (adaptado de [25])

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 24a). Posteriormente, a carga vertical, V , vai diminuindo e o escorregamento vai aumentando, até se verificar separação entre os materiais (ponto C, Figura 24a). Por fim a carga vertical, V , volta a aumentar e inicia-se um novo ciclo (ponto D, Figura 24a).

Observando o gráfico de força horizontal, H , em função da força vertical, V , (Figura 23b) 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 (9):

$$H = \tau_u b l + \mu V \quad (9)$$

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 2 mm e 3 mm.

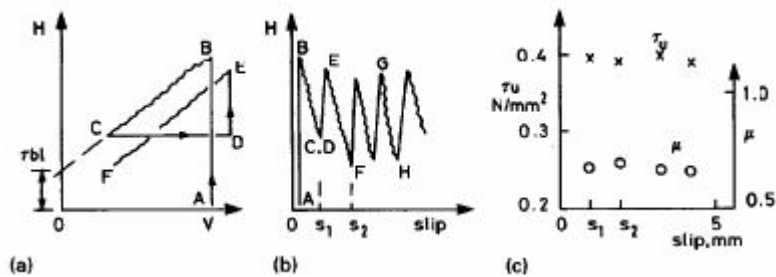


Figura 24 - Resultados do ensaio de escorregamento (adaptado de [25])

2.2.4 Ensaios 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), tornou-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 25). 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].

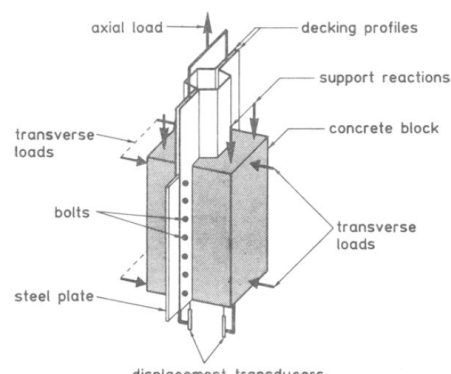


Figura 25 - Corpo de prova para ensaios de arrancamento (adaptado de [14])

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 26 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.

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".

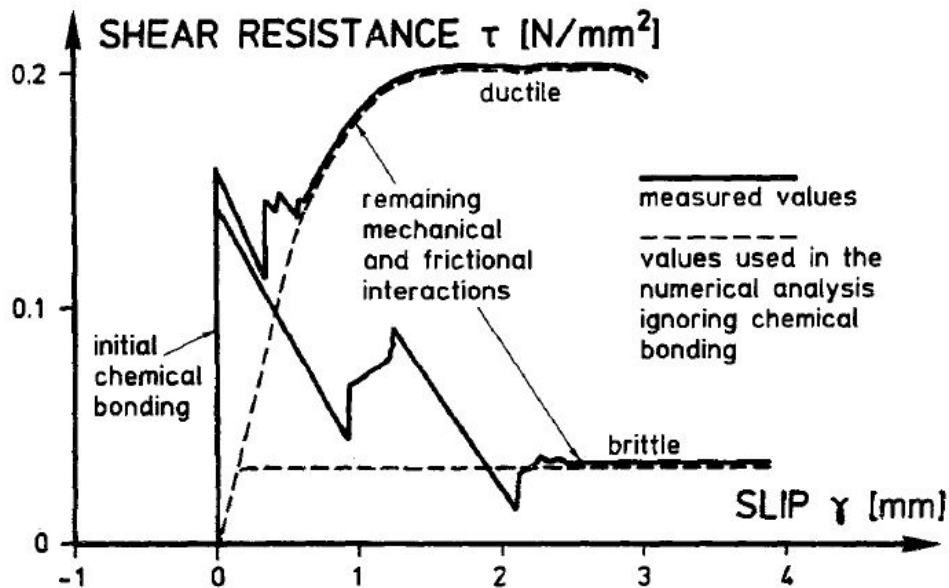


Figura 26 - Resultado típico de ensaios de arrancamento (adaptado de [14])

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 planas mantêm-se planas em flexão, 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 27).

Durante o ensaio, efetuaram-se medições dos deslocamentos verticais nos pontos de carga, a carga e o escorregamento na extremidade da secção, (Figura 28 a,b).

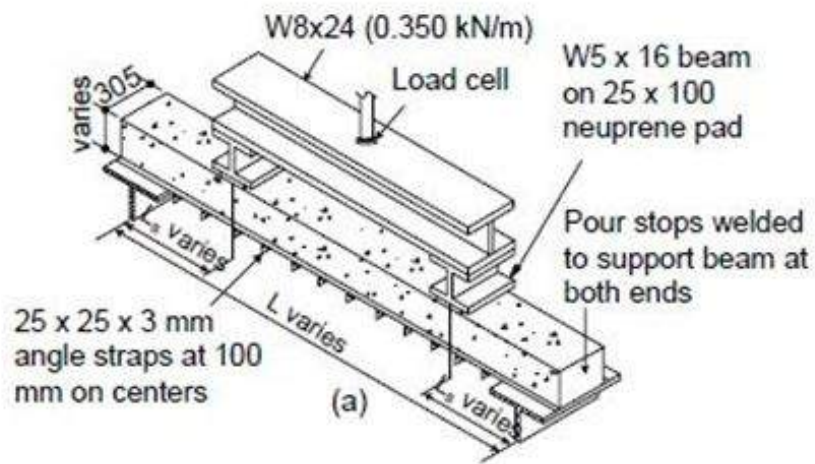


Figura 27 - Ensaio de flexão em uma nervura de laje mista (adaptado de [19])

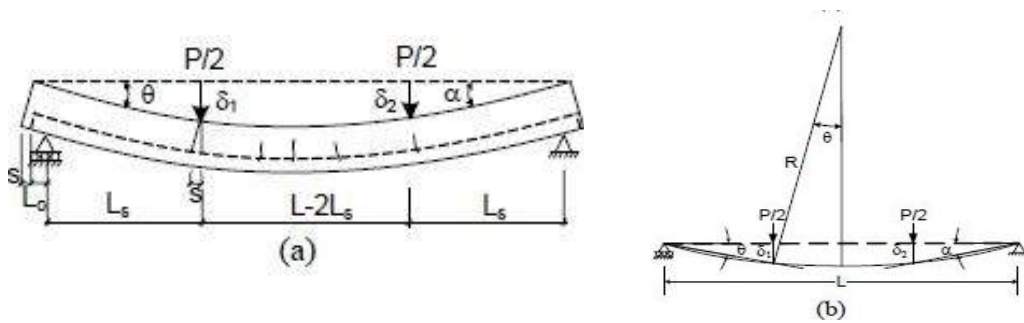


Figura 28 - Fissuração da laje ensaiada (a); Deslocamentos e curvatura da laje ensaiada (b) (adaptado de [18])

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].

Na Figura 29a, apresenta-se o diagrama de corpo livre que tem por base o método e os diagramas tipo de extensões (Figura 29b) e tensões (Figura 29c) da laje mista com interação parcial.

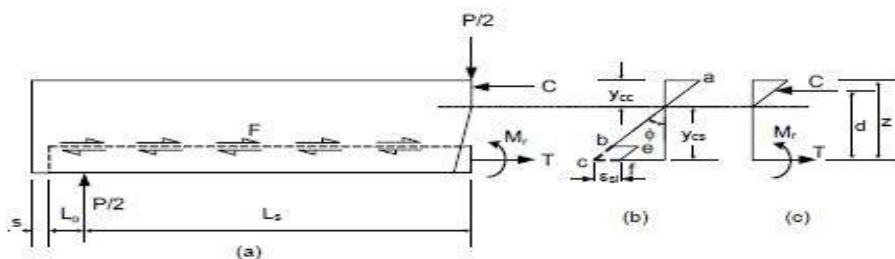


Figura 29 - Diagrama de corpo livre da laje (a); Diagrama de extensões (b); Diagrama de tensões e esforços internos (c) (adaptado de [18])

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 (10) [18][19], tendo em conta o binário de forças compressão- tração.

$$F_i = T_i = \frac{\left(\frac{P_i L_s}{2} - M_{ri}\right)}{z_i} \quad (10)$$

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 (11).

$$M_{ri} = \frac{\delta_{1i} + \delta_{2i}}{L_s(L - 2L_s)} E_s I_s \quad (11)$$

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 módulo de young do perfil;
- I_s é a inércia do perfil;

Quanto ao braço do binário de forças compressão tração, é determinado pela expressão (12) e depende da posição do eixo neutro da secção. A posição inicial, y_{cci} , depende só da geometria da secção mista, pois o betão não está fissurado.

$$z_i = d - \frac{1}{3} y_{cci} \quad (12)$$

em que:

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

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 (13).

$$y_{cci} = d - y_{csi} \quad \text{com} \quad 0 \leq y_{cci} \leq h_c \quad (13)$$

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.

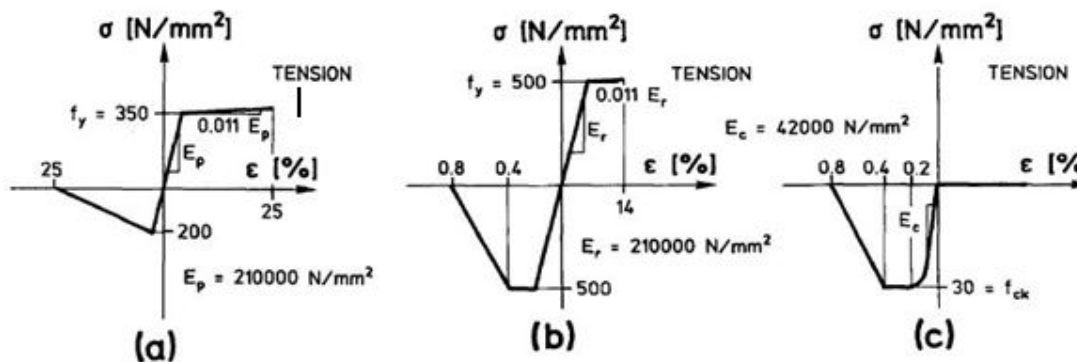


Figura 30 - Comportamento $\sigma - \epsilon$ dos materiais: a) chapa perfilada; b) rede electrosoldada; c) betão (adaptado de [14])

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, $\sigma - \epsilon$, 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 30).

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 o 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 oito nós e a chapa perfilada foi modelada tipo casca com elementos finitos quadrados de quatro 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 31).

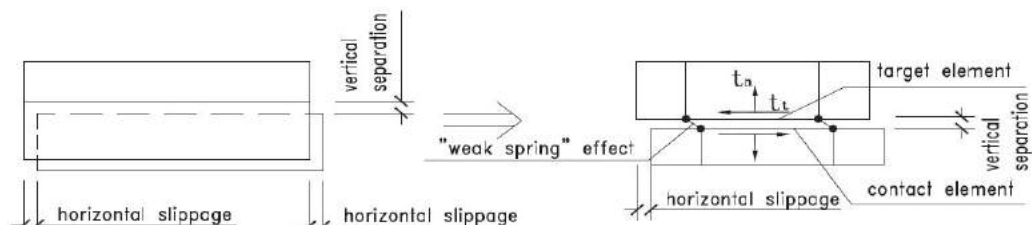


Figura 31 - Modelo analítico da interface aço-betão (adaptado de [6])

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".

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].

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 77 kN/m³ e 78,5 kN/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 as direções 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 32). Como incógnitas a determinar pelo método referem-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].

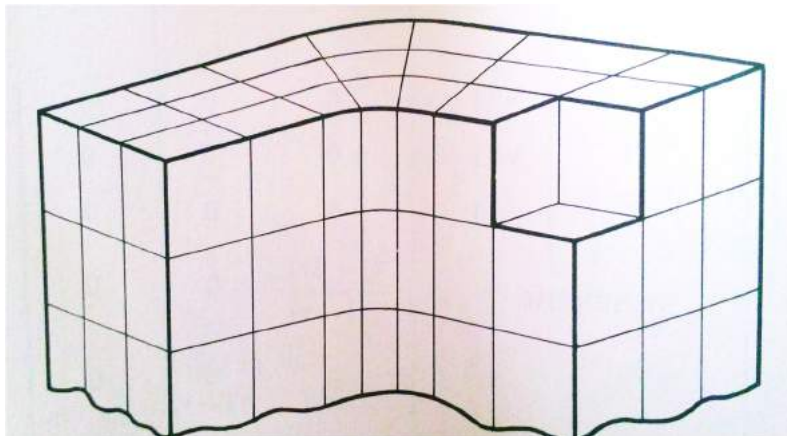


Figura 32 - Representação da fragmentação de um elemento contínuo (adaptado de [28])

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 da treliça de Mörsch é viável apenas em partes da estrutura.

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].

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 e 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" evidencia 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 "experiência 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 [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, desprezando o efeito das condições de apoio para uma secção que diste mais que a maior dimensão 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

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].

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.

Os provetes construídos foram 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, o corpo de prova foi construído com uma fração de chapa perfilada correspondente a um módulo com uma onda inferior do painel (Figura 33).

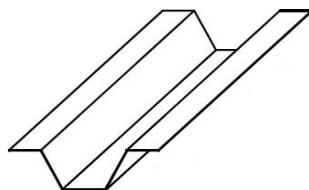


Figura 33 - Exemplo da fração de chapa perfilada a utilizar nos ensaios de arranque

Os provetes foram ensaiados em pares, sendo estes soldados, entre si, ao longo dos banzos inferiores e a perfis UPN120 ao longo do banzo superior (Figura 34), perfis nos quais foi 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 34).

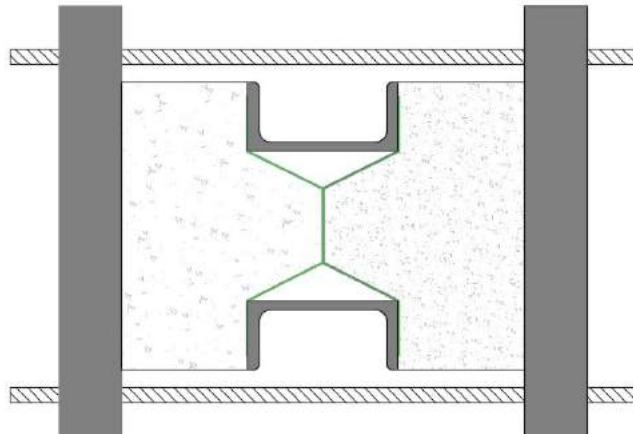


Figura 34 - Desenho esquemático dos corpos de prova (secção transversal)

Os ensaios laboratoriais dos provetes construídos foram realizados no laboratório de estruturas da Universidade da Beira Interior e com equipamentos e material auxiliar pertencente ao referido laboratório, que será apresentado no subcapítulo 4.7

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.

Construíram-se depois corpos de prova que permitiram avaliar 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.

Foram 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 foi 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, foi colocado betão com 10 cm de espessura, de forma a traduzir uma solução de laje colaborante com 16cm de espessura total.

Posteriormente, os provetes foram 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 a chapa perfilada H60[34] (Figura 35), pois previa-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 35 - Chapa perfilada H60

A secção retangular (Figura 36), 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.

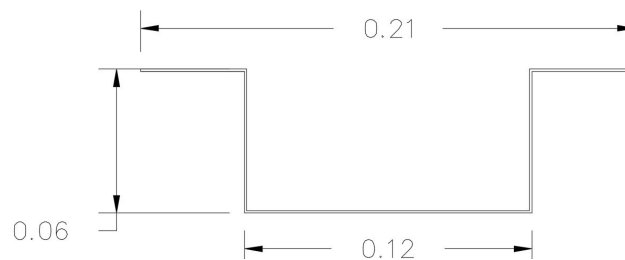


Figura 36 - Secção retangular em estudo

A secção reentrante (Figura 37), foi analisada por ser a geometria alternativa à trapezoidal e pretende-se estudar as vantagens e desvantagens entre elas.

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 C 25/30 com tensão característica (f_{ck}) de 25 MPa, 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 24,50 kN/m³.



Figura 37 - Secção reentrante em estudo

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 laterais 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 resultem apenas da solicitação, implicando 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 38. 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.

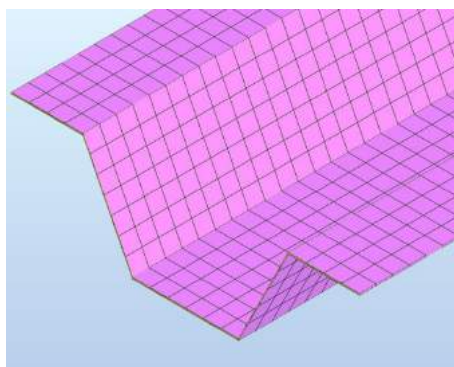


Figura 38 - Malha de EF de cálculo

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.

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 39, 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.

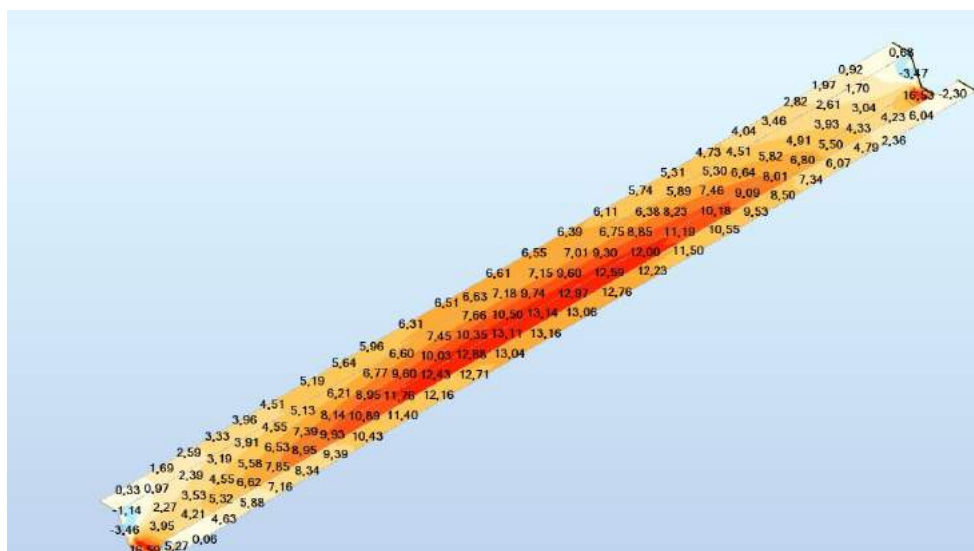


Figura 39 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Trapezoidal)

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.

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 40. 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 x vão (m) dos apoios, sendo esta a zona preferencial de

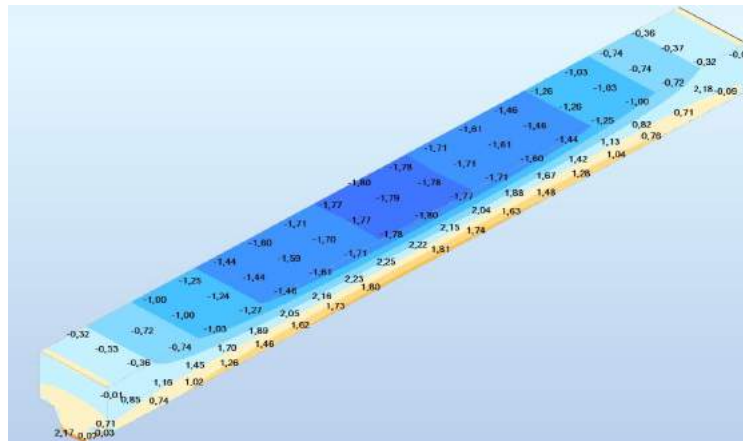


Figura 41 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Trapezoidal)

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 a fração de betão entre o a secção fissurada e o apoio escorrega sobre a chapa provocando o colapso total da laje.

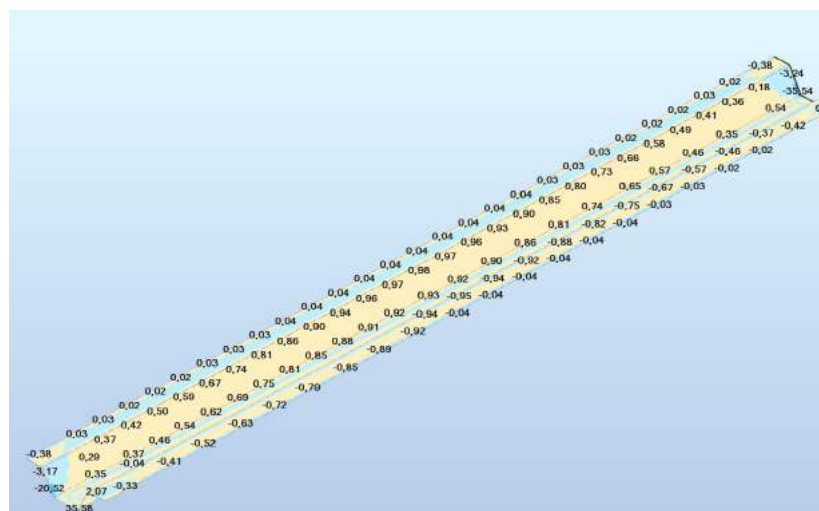


Figura 40 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Trapezoidal)

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 0,65 MPa, Figura 40.

Atento nas tensões tangenciais com orientação perpendicular à chapa perfilada observam-se as forças que são absorvidas pelo “efeito de cunha” descrito no subcapítulo 2.1.

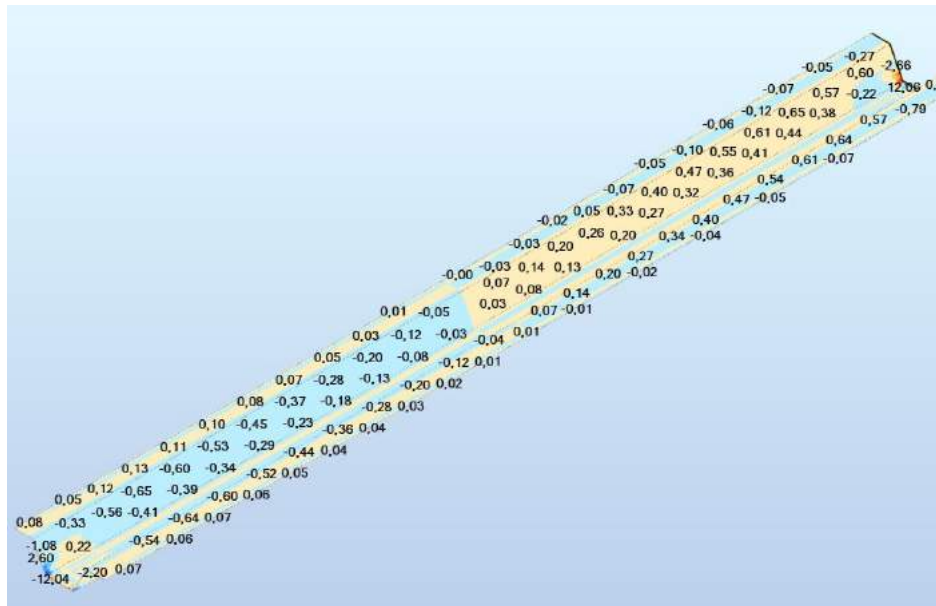


Figura 42 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Trapezoidal) Ao longo de todo o vão verificam-se as forças de separação dos materiais conforme descrito no subcapítulo 2.1.2. Em flexão, os materiais com deformabilidade diferente, tendem a separar-se. A existência deste fenómeno é demonstrada pelo estudo, apresentando as tensões calculadas segundo o eixo vertical numa faceta vertical, Figura 43, que apresenta trações na interface, segundo o eixo vertical.

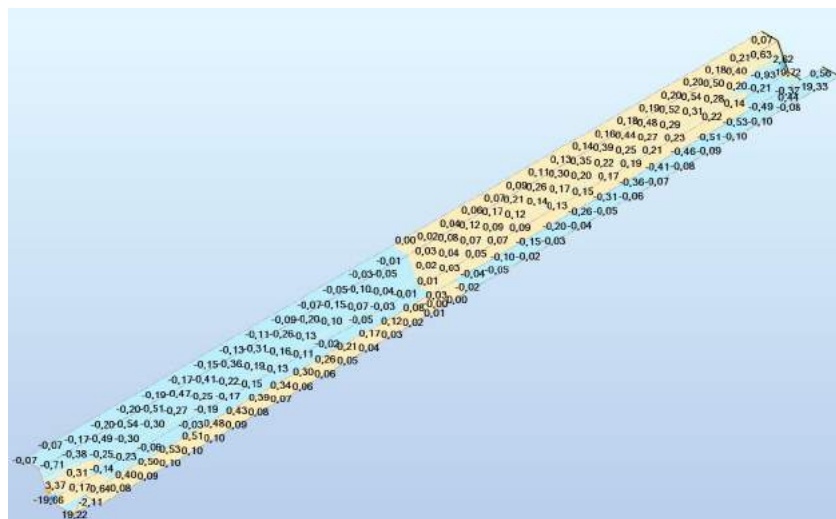


Figura 43 - Tensões transversais, τ_{xy} , na interface aço- betão (Secção Trapezoidal)

Analisando a secção reentrante, verifica-se que tem comportamento 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 46, e de magnitude 8,91 MPa.

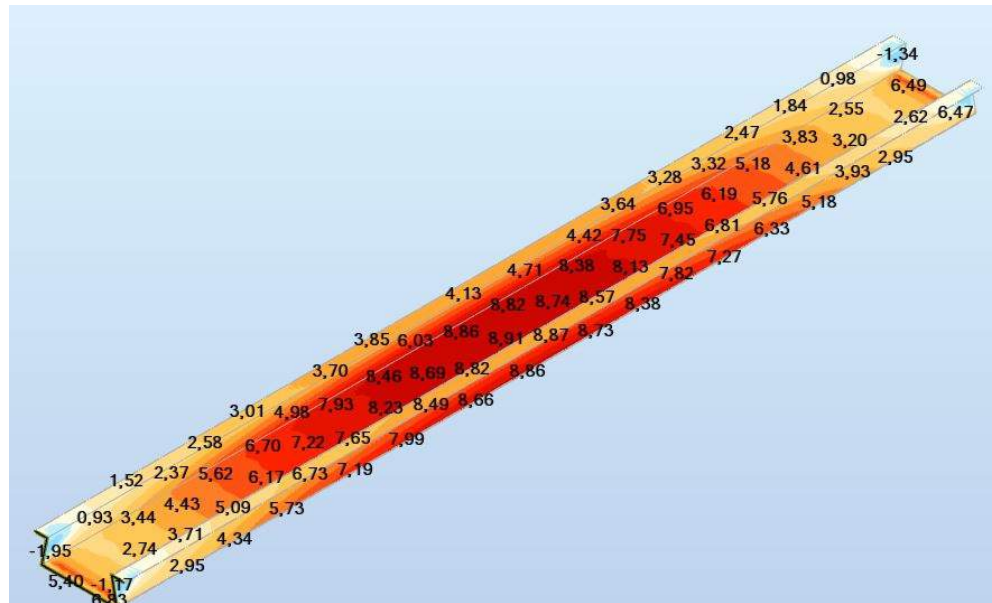


Figura 46 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)

Observando as tensões segundo o eixo longitudinal da secção de betão, Figura 47, 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.

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

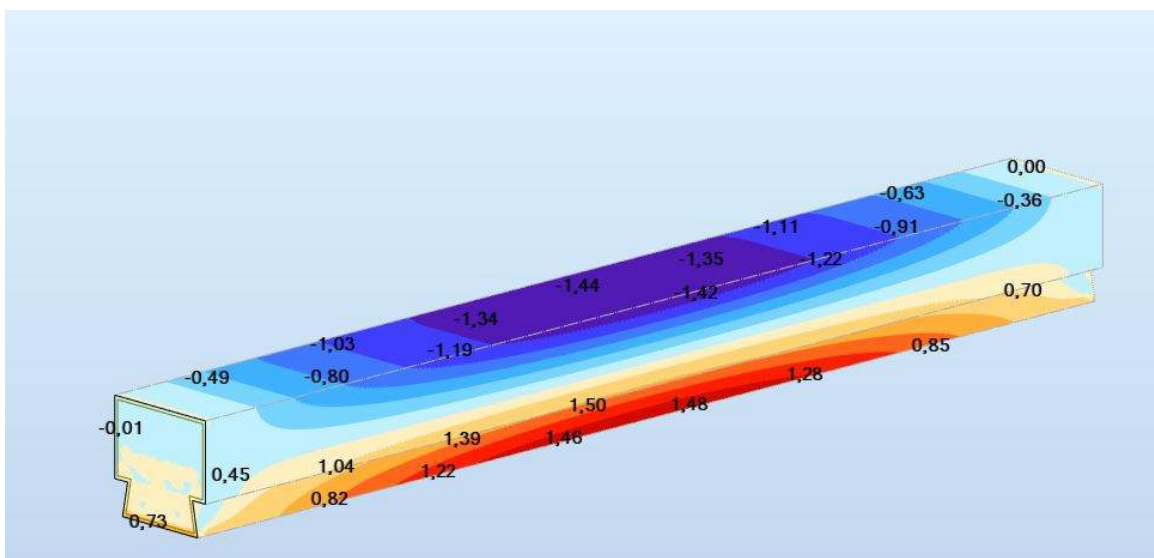


Figura 47 - Tensões, σ_{xx} , no betão (Secção Reentrante)

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 48). 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 48.

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

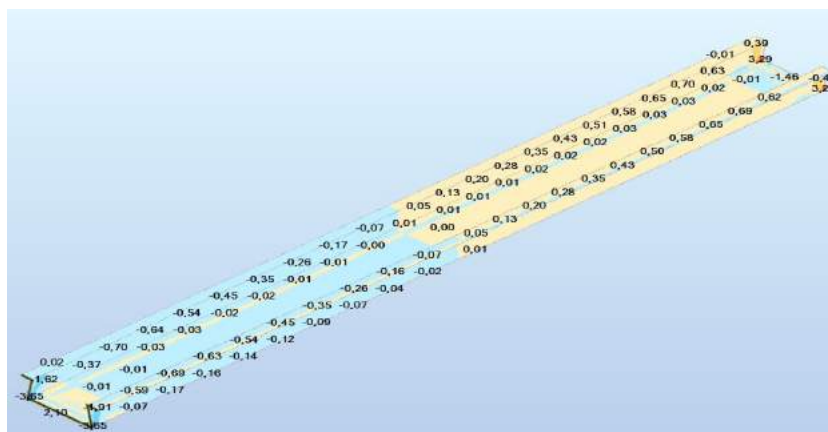


Figura 48 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Reentrante)
 No caso em estudo, verifica-se que a secção crítica é, também a 0,05 x vão (m) dos apoios, apesar de as forças na zona superior da alma da chapa perfilada apresentarem orientação descendente e maior magnitude que as atuantes na zona inferior da alma, que têm orientação ascendente, Figura 49. Na secção mais solicitada a força descendente tem 0,22 MPa de intensidade, conjugada com a força ascendente de intensidade próxima de 0 MPa.

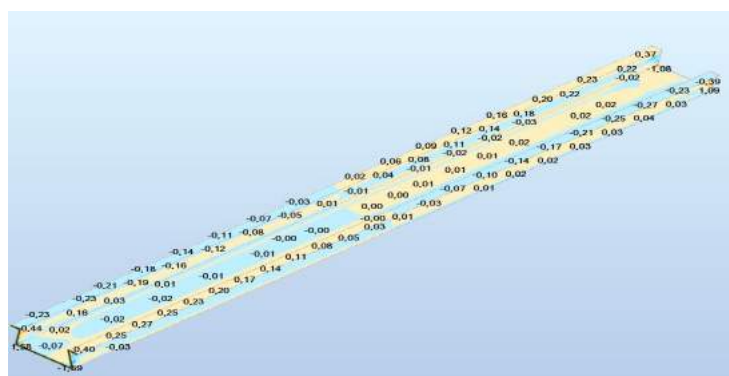


Figura 49 - Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Reentrante)

Ao longo de todo o vão, verificam-se as forças de separação dos materiais conforme descrito no subcapítulo 2.1.3. 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 50, não apresentam trações que produzem separação vertical dos materiais, nas almas.

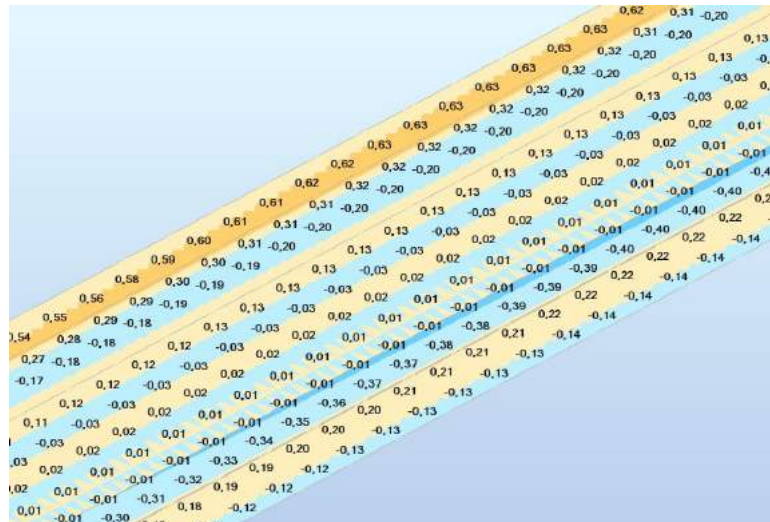


Figura 50 - Tensões de separação dos materiais ao longo da interface aço-betão (Secção Reentrante)
 Da análise das tensões de separação vertical na chapa perfilada com secção reentrante, observa-se que as forças de separação vertical têm orientação inversa face à secção trapezoidal e a magnitude é significativamente menor. Para este tipo de chapa, a separação dos materiais não ocorrerá ao nível das almas da secção.

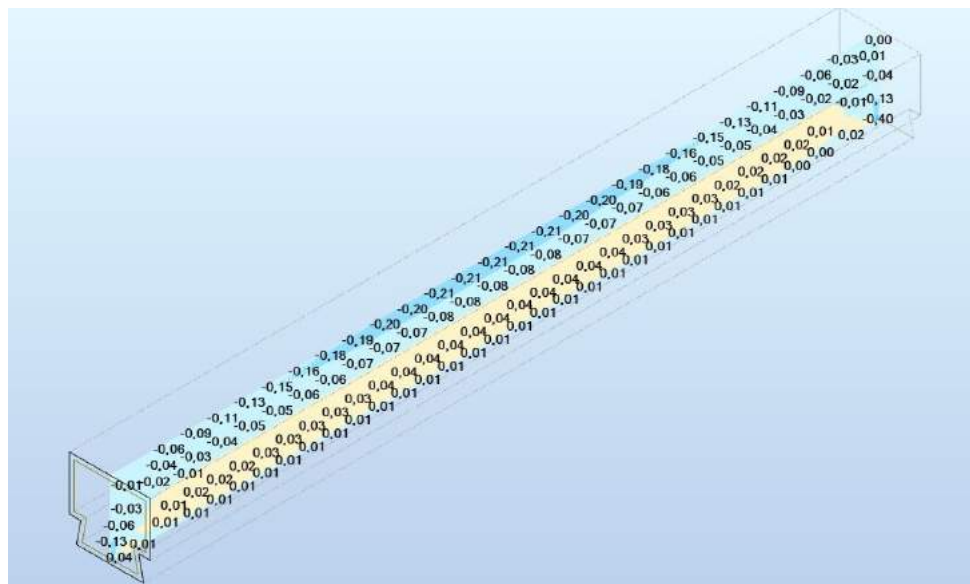


Figura 51 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Reentrante)

Do estudo da secção reentrante, há ainda a referir que as trações segundo o eixo horizontal, perpendicular ao vão, Figura 51, têm menor magnitude comparativamente à secção trapezoidal. Na Figura 52, 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.

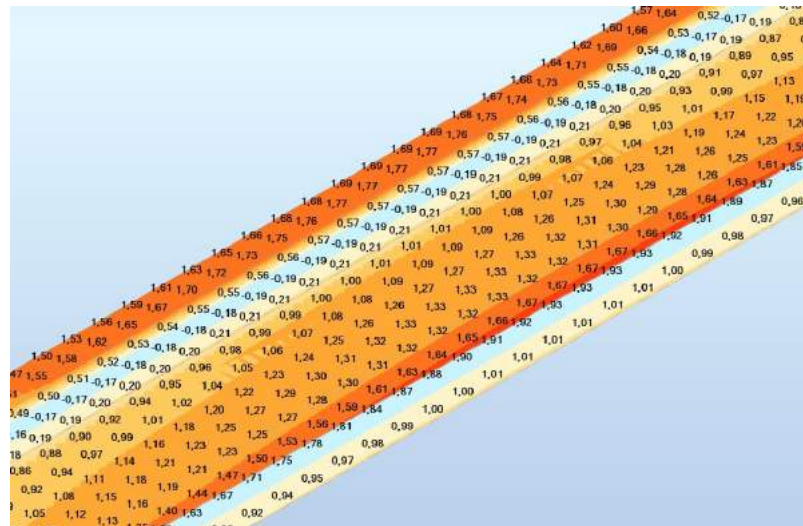


Figura 52 - Tensões, σ_{yy} , na chapa perfilada (Secção Reentrante)

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 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 53, e magnitude 12,90 MPa.

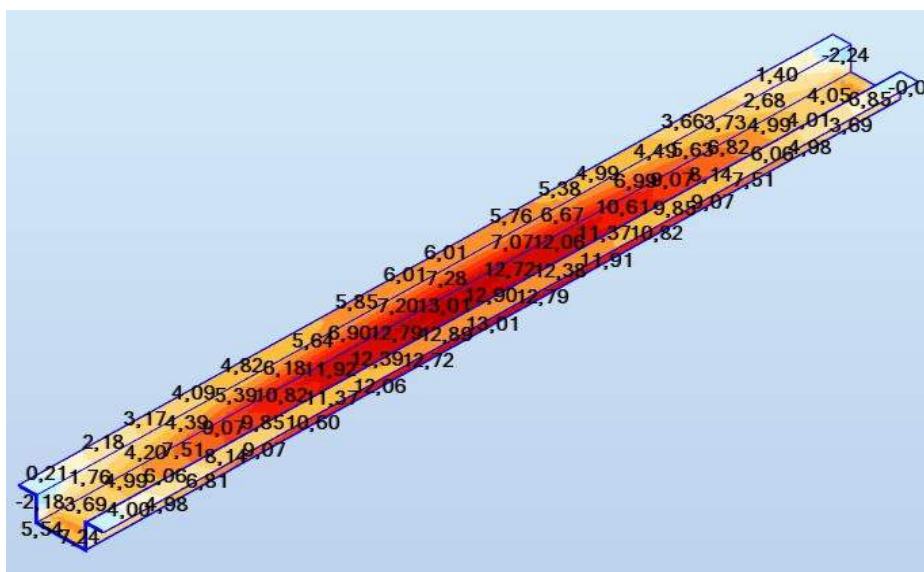


Figura 53 - Tensões, σ_{xx} , na chapa perfilada (Secção Retangular)

Observando as tensões segundo o eixo longitudinal da secção de betão, Figura 54, 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.

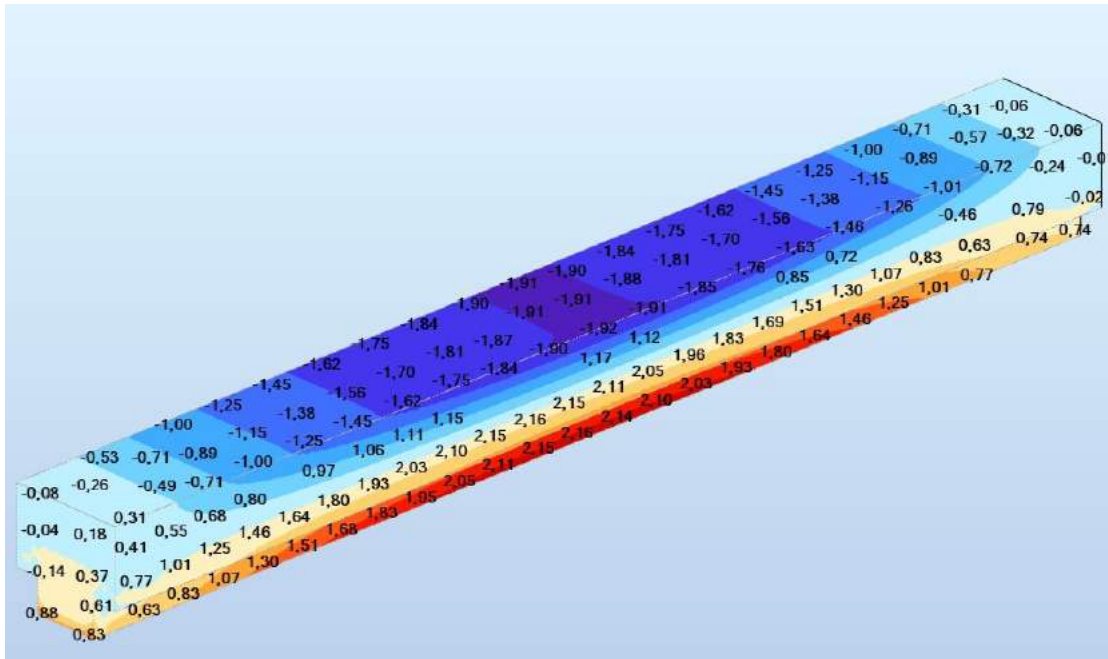


Figura 54 - Tensões, σ_x , no betão (Secção Retangular)

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 55. 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 2 m 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 55).

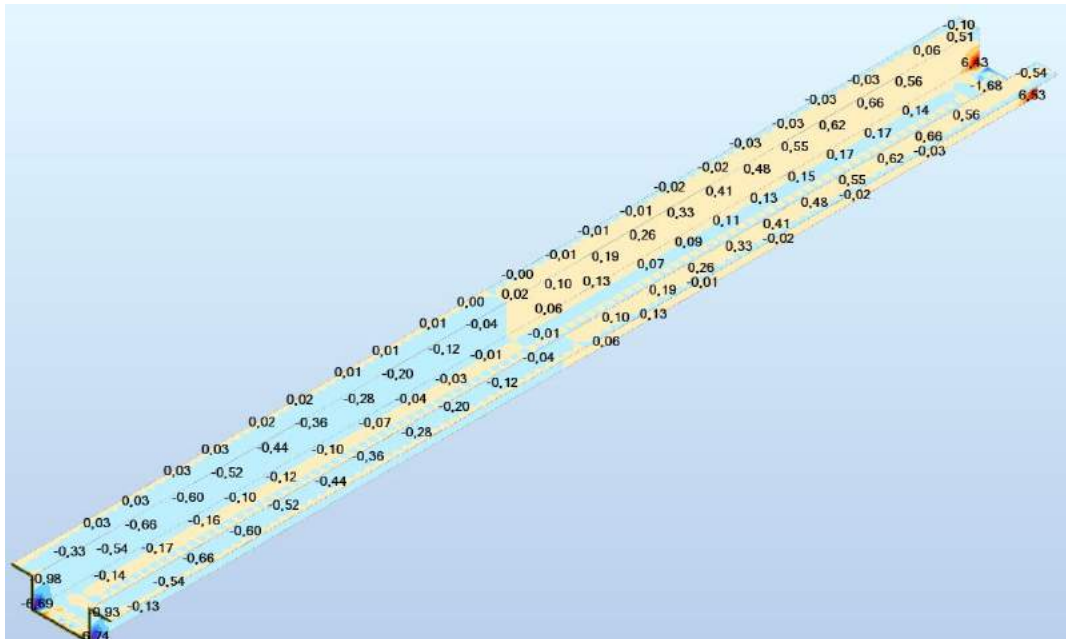


Figura 55 - Tensões longitudinais, τ_{yx} , na interface aço - betão (Secção Retangular)

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

No caso em estudo, a secção crítica é, também a 0,05 x 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 56).

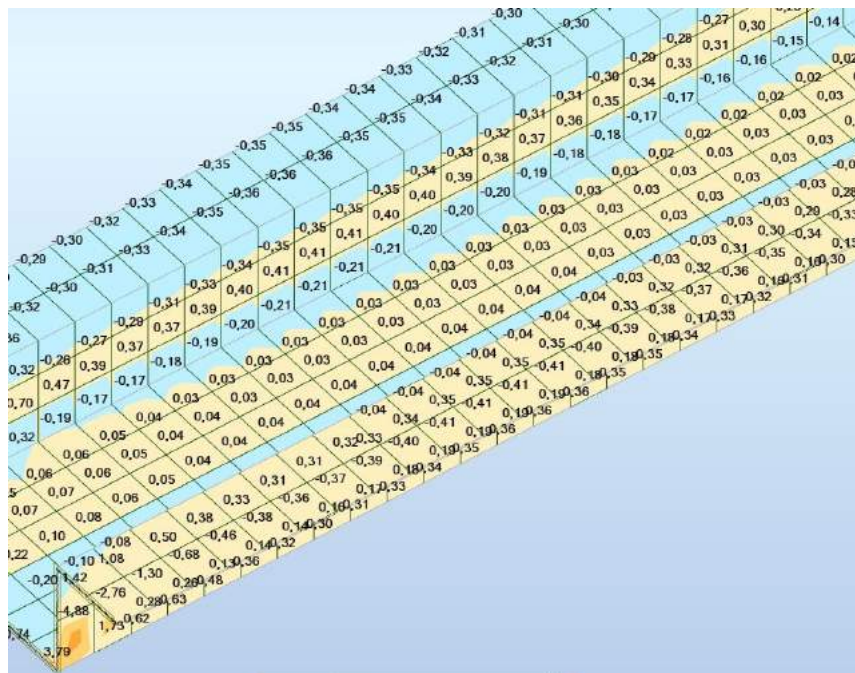


Figura 56 - Tensões transversais, τ_{xx} , na interface aço- betão (Secção Retangular)

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

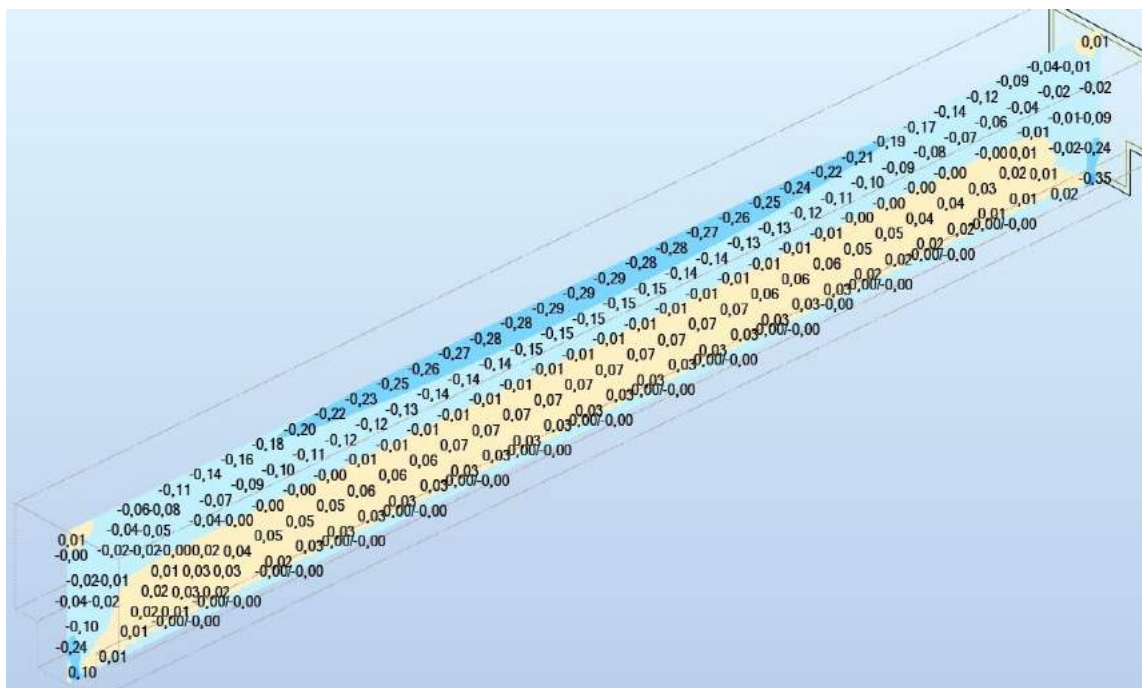


Figura 59 - Tensões, σ_{yy} , no betão (corte segundo o plano XZ) (Secção Retangular)

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 solicitação 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 solicitação 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 solicitação 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 é dotada de 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 à chapa perfilada.

Com base na análise de tensões efetuada no subcapítulo 4.2, conclui-se que a secção trapezoidal permite utilizar o material, aço, de uma forma mais eficiente.

Perante a 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 (13), de forma a identificar as variações de orientação dos eixos principais ao longo do vão da laje.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \text{(MPa)} \quad (13)$$

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 60 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.

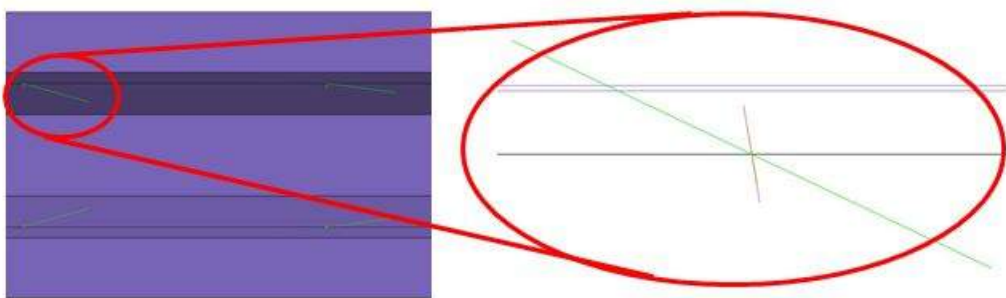


Figura 60 - Representação em planta dos eixos principais

Observando a representação da secção em corte, Figura 61, e o alçado, Figura 62, 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.

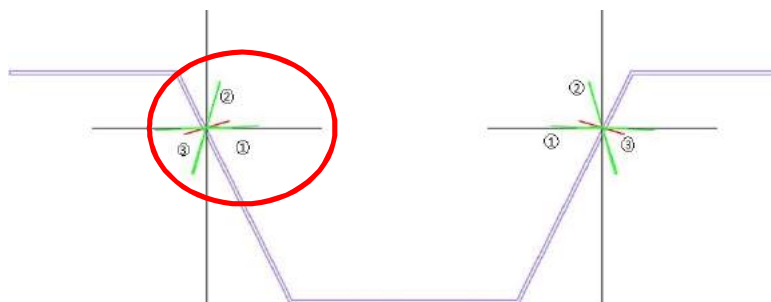


Figura 61 - Representação em corte transversal dos eixos principais

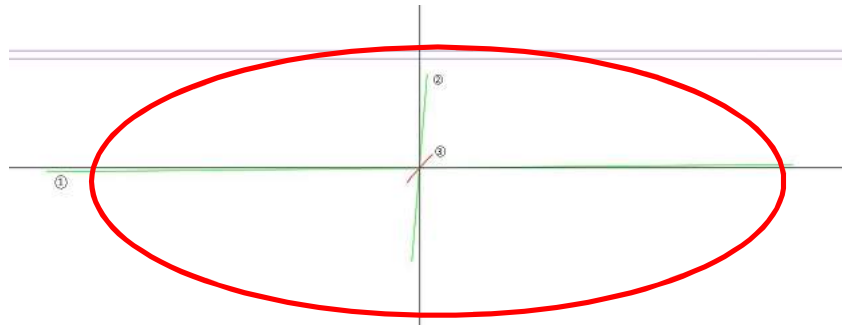


Figura 62 - Representação em alçado dos eixos principais

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, se verifica no núcleo de betão do compreendido entre as almas do módulo de chapa e pelo subcapítulo 2.1.1, irá fletir localmente as almas da chapa perfilada.

Analisando a orientação em todos os pontos de cálculo, sendo alguns representado esquematicamente na Figura 63, 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.

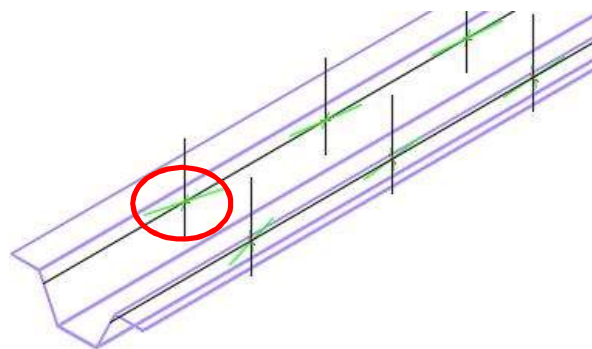


Figura 63 - Representação tridimensional dos eixos principais

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 atrás.

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 virtual, face à solicitação e condições de apoio que foram estabelecidas anteriormente, um módulo de chapa perfilada com 2m de vão e simplesmente apoiada.

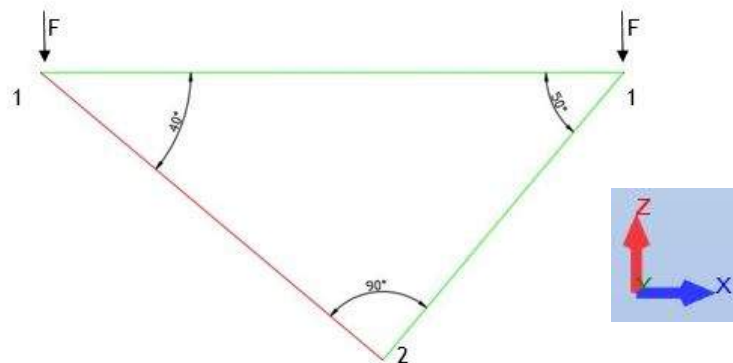


Figura 64 - Inclinação das escoras e tirantes da treliça de betão

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 64 a 67 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 64 para a construção do modelo virtual.

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, s_1 , descrita no subcapítulo 4.3.

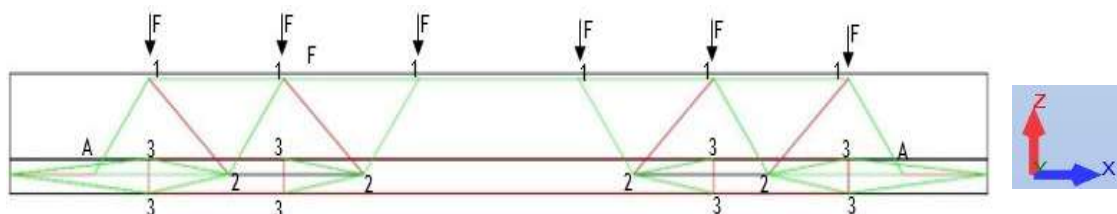


Figura 65 - Alçado do modelo de escoras e tirantes

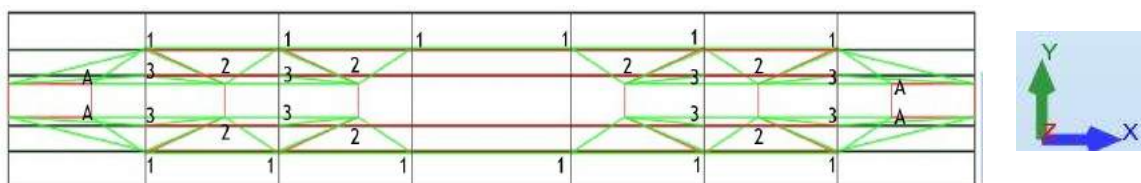


Figura 66 - Planta do modelo de escoras e tirantes

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 zz) 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 chapa perfilada. 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.

Na Figura 65 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 efeito dos vários

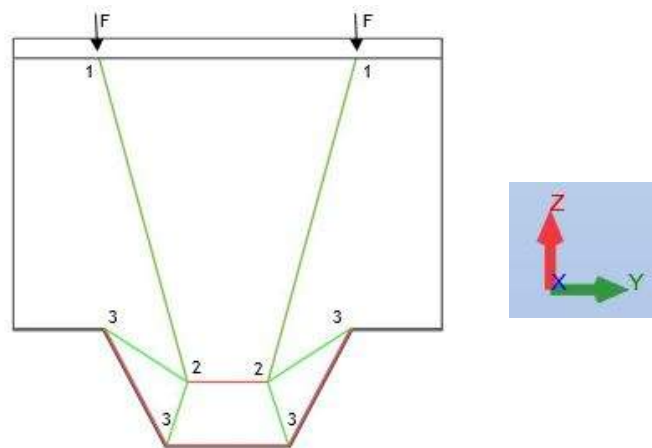


Figura 67 - Corte do modelo de escoras e tirantes

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 68 e Figura 69.

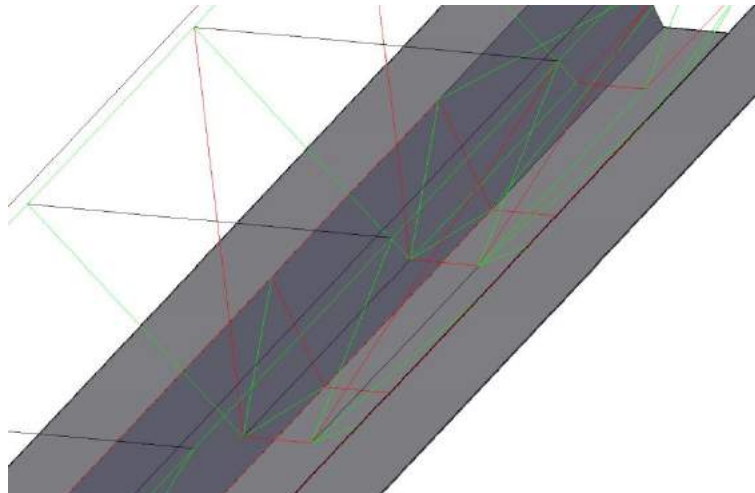


Figura 68 - Modelo virtual de escoras e tirantes



Figura 69 - 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 70) 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 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 a chapa perfilada.

Assim o caminho de carga descrito pela força na laje inicia-se nos nós número "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.

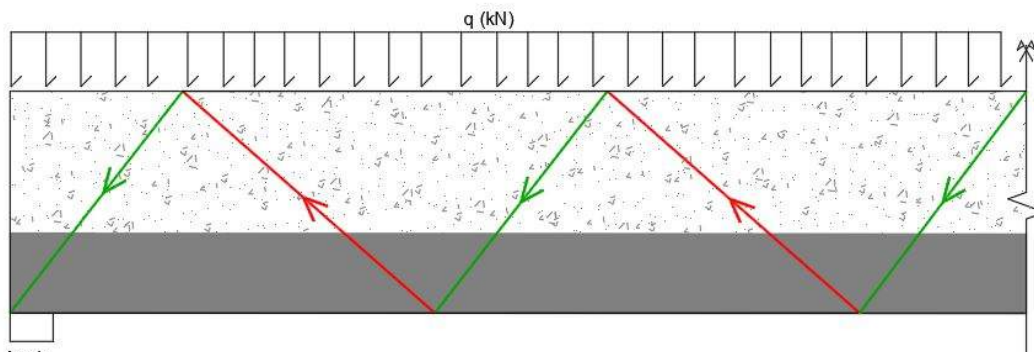


Figura 70 - Caminho de carga (Secção Trapezoidal)

4.6 Aplicação com modelo de escora e tirantes

Recorrendo ao modelo virtual de escoras e tirantes descrito no subcapítulo 4.4 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 2 m de vão e 20 cm 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.

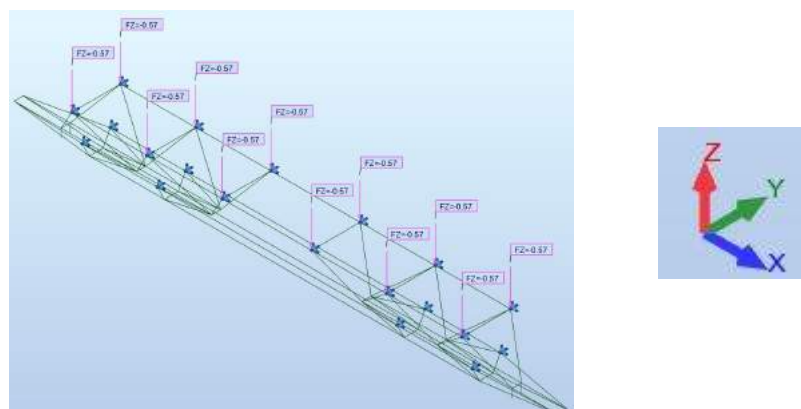


Figura 71 - Modelo de escora e tirantes construído no software

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, apresentam esforços de compressão que serão equilibrados por trações nas bielas que traduzem a chapa perfilada.

Na Figura 73 apresentam-se os esforços atuantes recolhidos do software de cálculo. A convenção de sinais é contrária 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. 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 72, 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.

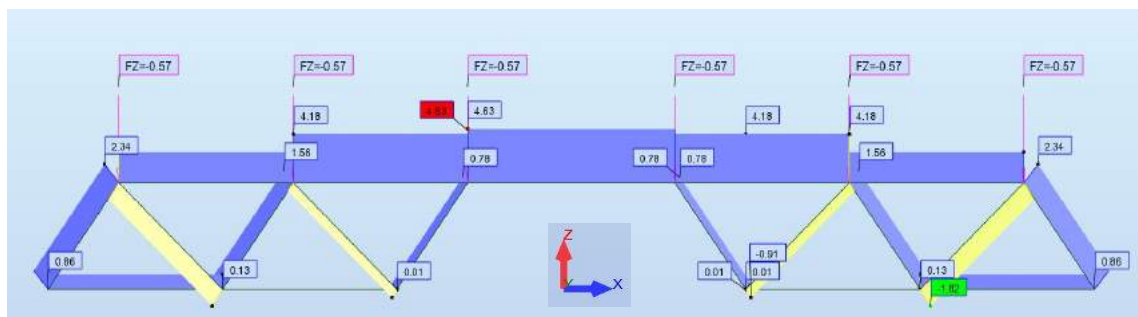


Figura 73 - Esforços na treliça de betão

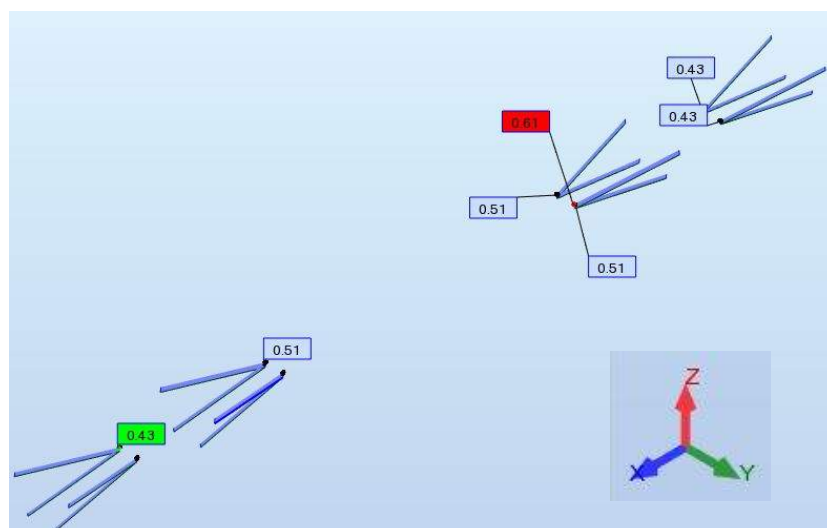


Figura 72 - Escoras de ligação entre os materiais

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 kN no banzo superior e 0,54 kN no inferior (Figura 75). Como foi referido no subcapítulo 4.4, 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 74.

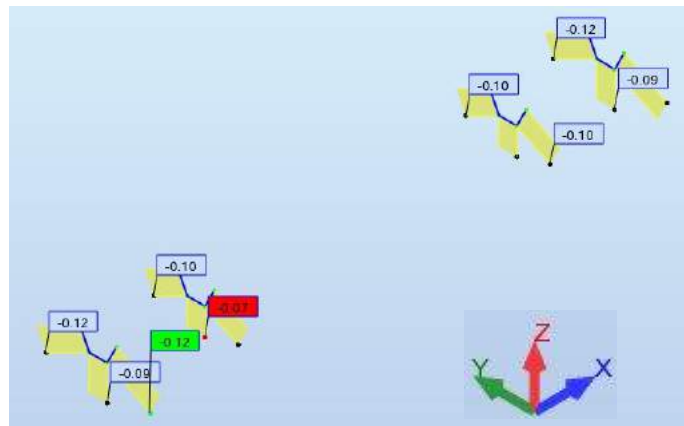


Figura 74 - Trações nos banzos da chapa perfilada

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, são fundamentais para o equilíbrio da estrutura, dado que é através

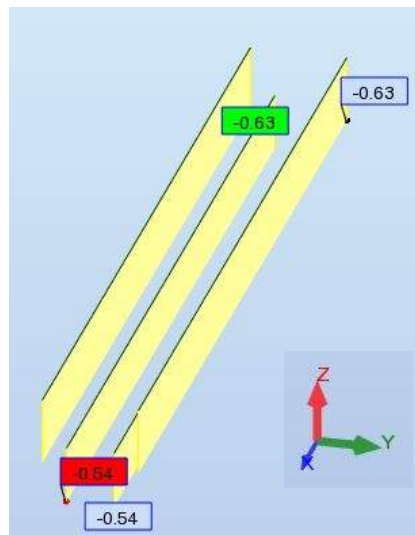


Figura 75 - Trações transversais no banzo inferior e almas da chapa perfilada desta ligação que se garante o comportamento misto dos materiais.

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 76).

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.

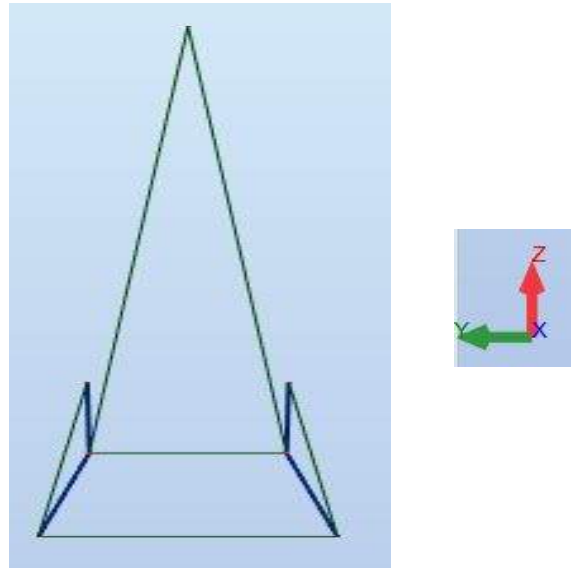


Figura 76 - Adaptação do STM à secção reentrante

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 é 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 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 as 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 relativamente ao 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 consequentemente a resistência global do elemento estrutural.

Aumentando 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 frágil. 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 77), 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 77 - 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 chapa 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 78, 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 sollicitação 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°.

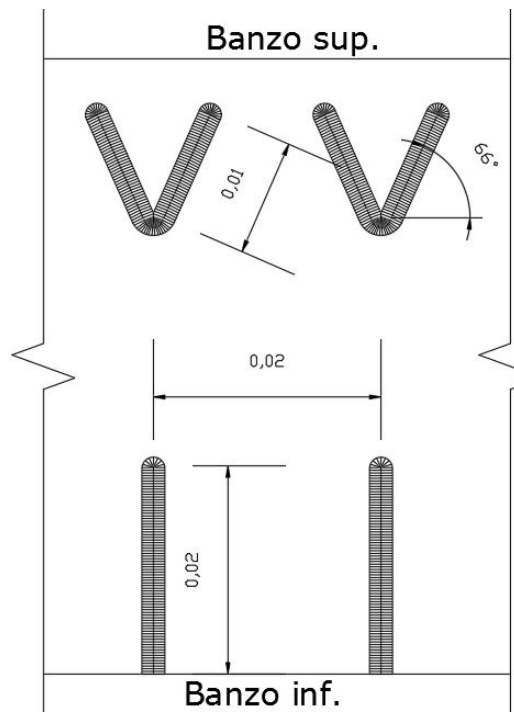


Figura 78 - Solução proposta - Alçado da alma da chapa

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 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 com perfil H60 e dimensões 0.30x0.205 m, banzo inferior contra banzo inferior com pontos de solda afastados de aproximadamente 5cm entre eles (Figura 79 e 81). Posteriormente estes foram aplicados nos perfis UNP 120 e fixos com pontos de solda nas extremidades.



Figura 79 - Soldadura dos corpos de prova para a nova solução proposta



Figura 80 - Soldadura dos corpos de prova para a secção H60

Na fase seguinte, executaram-se mais pontos de solda ao longo de toda a ligação entre as chapas perfiladas e os perfis UNP 120. De forma a melhorar a ligação entre a chapa perfilada os perfis UNP 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, 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 81).

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



Figura 81 - 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 4 mm de espessura às "bossas" (Figura 82), pretendendo assim simular o resultado final do processo de fabrico por equipamentos de cunhagem e quinagem como foi observado na visita à 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 10 cm sobre cada chapa perfilada.



Figura 82 - Rebarbagem de varões



Figura 83 - Provette 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 84).



Figura 84 - 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

Tabela 2 - Características dos corpos de prova

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 85 e 87). Esta força axial provocou 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 85 e 87).

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

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

Ao longo do ensaio, foi 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 recorreu-se de dispositivos de recolha e aquisição de dados.

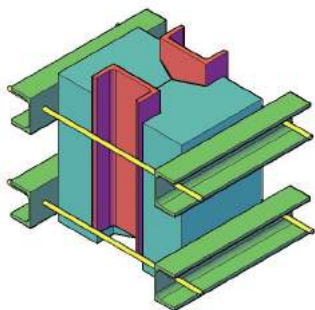


Figura 85 - Imagem tridimensional - vista superior

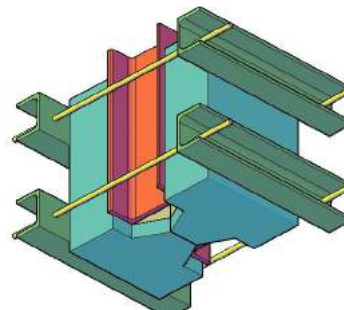


Figura 86 - Imagem tridimensional - vista inferior

5.3 Preparação dos ensaios laboratoriais

Nesta fase recorreu-se dos equipamentos e estruturas disponíveis no laboratório de estrutura. 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 87).



Figura 87 - 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 e 91).

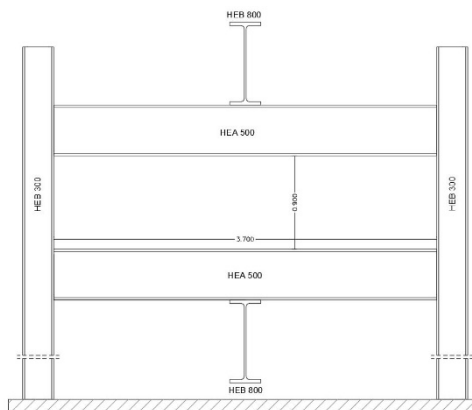


Figura 91 - Esquema da estrutura seleccionada



Figura 90 - Fotografia da estrutura seleccionada

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, enquanto 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 1063 kNm, contudo as vigas transversais transmitem-lhes carga, minorando a capacidade resistente global à flexão para 995 kNm.

A primeira montagem laboratorial foi 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, inferior 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 foi executada de forma sequencial. Inicialmente aplicaram-se os tirantes, montados com os perfis UPN 80, e pré-esforçaram-se com uma chave dinamométrica 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 Anexo 1. Concluída a preparação do corpo de prova, apoiou-se sobre a viga inferior do pórtico descrito no subcapítulo 5.3, e colocou-se, sobre os perfis UPN120, uma chapa de aço com dimensões 300x250x25 mm que tem como função transmitir carga axial, gerada pelo macaco hidráulico, aos perfis UPN120.

Posteriormente calibrou-se a célula de carga e instalou-se sobre a chapa anterior. Por fim, colocou-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, colocaram-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 foi instalado mais um par de transdutores sob o banzo da viga HEB 500. No subcapítulo apresentam-se os desenhos da montagem laboratorial (Figura 92).

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 92 - Montagem Laboratorial - primeira fase de ensaios

5.4.2 Procedimento experimental

A realização do trabalho experimental iniciou-se verificando que todos os equipamentos de aquisição de informação estavam devidamente calibrados e que o registo de informação estava a ser executado de forma correta. Posteriormente, introduziu-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, iniciou-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 iniciou-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 foi feito apenas quando os registos do Datalogger são estáveis.

No final do ensaio laboratorial a informação registada pelo Datalogger foi 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. 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 constante ao longo de todo o desenvolvimento (Figura 93).

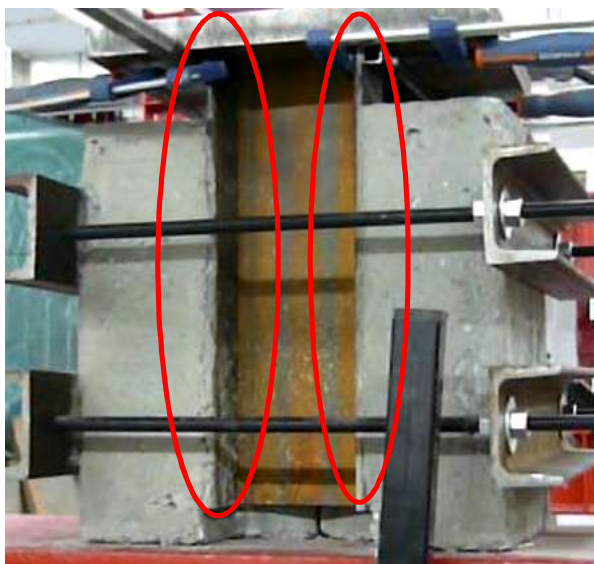


Figura 93 - Primeira fissura (50 kN $\delta=0,12\text{mm}$) - CP.1.H60

Com o contínuo incremento de carga transmitida ao corpo de prova, a cedência dos materiais foi mais audível e as fissuras tenderam a aumentar a abertura, acompanhando estas manifestações o deslocamento relativo entre os materiais também aumentou.

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

À carga de 128 kN o corpo de prova atingiu a capacidade máxima, houve libertação de fragmentos de betão e a fissura vertical entre os materiais apresentava aproximadamente 2mm de abertura (Figura 94).

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, 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.

Apresenta-se também, no Anexo 4, a informação recolhida do ensaio laboratorial.

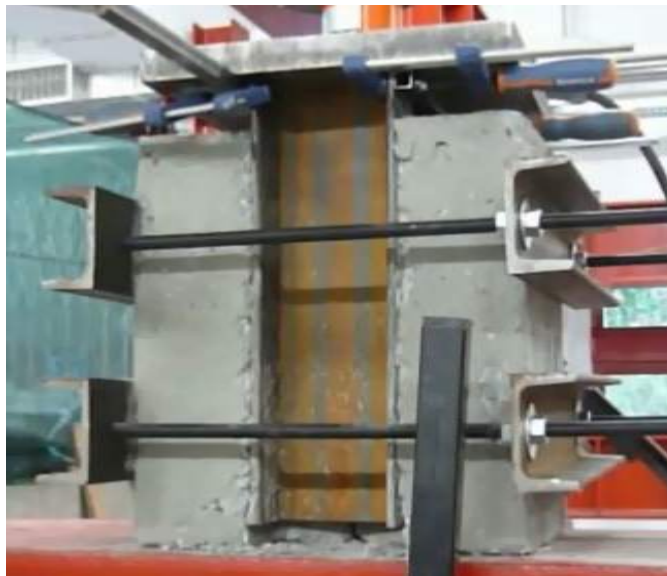


Figura 94 - Corpo de prova após rotura (128 kN $\delta=11,86\text{mm}$) - CP.1.H60

Em seguida testou-se o corpo de prova CP.2.H60 com as mesmas condições e procedimentos experimentais do 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 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 (150x150x150 mm) 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, C25/30 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 Anexo 3. Verificou-se esmagamento 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 96. A chapa perfilada não apresentava deformações plásticas visíveis a quando do desmonte do corpo de prova (Figura 97).



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



Figura 95 - Interface no aço - CP.1.H60 após rotura



Figura 97 - Vista superior - CP.1.H60 após rotura

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 foi 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 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 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 longo 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 intensa do fenómeno (Figura 98), 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.



Figura 98 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.2.H60

Analisando a tensão instalada em cada bossa dos CP.1.H60 e CP.2.H60, considerando que apenas 1 cm superior e 1 cm 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 média do betão C25/30 à idade do ensaio (28 dias) de 39 MPa, compatível com o fenómeno observado.



Figura 99 - Face da chapa após rotura - CP.2.H60

A chapa perfilada não apresentou qualquer deformação plástica desenvolvida pelo ensaio, nem na geometria da secção nem na configuração das bossas. Contudo verificaram-se vestígios de

fricção entre as extremidades das bossas e betão, não se verificando na zona central das bossas (Figura 99).

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 foi executada de forma sequencial. Inicialmente aplicaram-se os tirantes, montados com os perfis UPN 80, e pré-esforçaram-se a 10 Nm (momento de aperto) , que se traduz em 6 kN de esforço axial, segundo a calibração apresentada no Anexo 1. Após a preparação do corpo de prova, marcou-se o eixo do ensaio no local e recorreu-se a paralelepípedos de granito com dimensões 100x100x200 mm e a uma chapa de aço com dimensões 400x400x28 mm 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, o provete foi colocado sobre a chapa metálica e centrado em relação ao eixo do ensaio. Posteriormente, sobre os perfis UPN120, colocou-se uma chapa de aço com dimensões 300x250x25 mm que teve a função de transmitir carga axial, gerada pelo macaco hidráulico, à parte metálica do corpo de prova. Calibrou-se a célula de carga e instalou-se sobre a chapa anterior. Por fim, colocou-se uma chapa metálica de dimensões 195x155x10mm entre a célula de carga e o primeiro macaco hidráulico. Consecutivamente colocou-se outra chapa de aço de dimensões 200x145x10 mm e instalou-se o último macaco hidráulico. Verificou-se se todos os componentes estavam devidamente alinhados e colocaram-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 segundo o eixo de ensaio (Figura 100), colocaram-se dois transdutores de deslocamentos, que permitiram 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 foi 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 Anexo 5 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 100 - Montagem Laboratorial - segunda fase de ensaios

5.5.2 Procedimento experimental

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

Com todas as verificações efetuadas, iniciou-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 iniciou-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 foi efetuado apenas quando os registos são estáveis.

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

5.5.3 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 subcapítulo 4.7. O incremento de carga foi efetuado conforme descrito no subcapítulo 5.5.2.

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 101).



Figura 101 - 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 foi audível e as fissuras tenderam a abrir, 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 atingiu a capacidade máxima, havendo libertação de fragmentos de betão e a fissura vertical entre os materiais apresentava aproximadamente 2mm de abertura (Figura 102).

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, 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 registrar todos os dados em intervalos de tempo constantes de um segundo.



Figura 102 - 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. Apresenta-se também, no Anexo 7, 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 kN, sendo esta a carga máxima verificada acompanhada de um deslocamento 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 C25/30 (150x150x150 mm) 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.

5.5.4 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 Anexo 6. Verificou-se esmagamento do betão na zona das bossas da chapa perfilada (Figura 105 e 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 apresentou deformações plásticas (Figura 103).



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



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



Figura 103 - 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 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 101. 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 kN com deslocamento relativo entre os materiais de 1,3 mm 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 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 106 - Esmagamento do betão na interface (betão) - CP.4.NSP

Analisou-se o remanescente dos corpos de prova CP.3.NSP e CP.4.NSP e observou-se que as almas da chapa perfilada se encontram fletidas. No corpo de betão havia indícios de esmagamento de betão nas zonas das bossas construída e na zona lisa, sem bossas, o betão encontrava-se intacto (Figura 106).

Quanto à tensão instalada em cada bossa dos CP.3.NSP e CP.4.NSP, considerou-se 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, verificou-se uma tensão máxima instalada de 68,14 MPa superior à resistência média do betão à idade do ensaio (180 dias) de 60 MPa, compatível com o fenómeno observado.



Figura 107 - Face da chapa após ensaio - CP.4.NSP

A chapa perfilada apresentava deformações plásticas ao longo das almas. Entre as bossas inferiores encontraram-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".

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 consideraram-se as forças envolvidas no fenómeno e a resistência dos materiais. Assim, apresentam-se os possíveis cenários que conduziram os corpos de prova à rotura:

Esmagamento no betão - O betão que se encontra moldado às bossas das chapas perfiladas sofreu 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 deixou de contactar com as bossas.

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

Deformação da chapa perfilada - Caso a componente horizontal do esforço que se encaminha para a chapa, através do efeito de cunha das bossas e 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.

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, consequentemente, 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 propôs-se um modelo de escoras e tirante (Figura 108) 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, aos 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 teve-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.

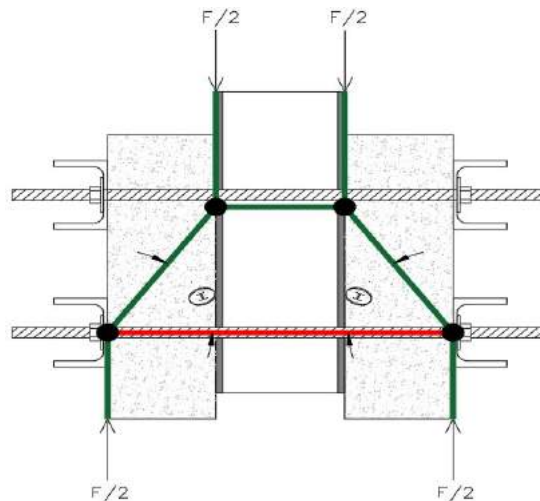


Figura 108- Modelo de escoras e tirantes do ensaio

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. 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 as bossas 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, 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 5.5.4, referente à segunda fase de ensaios, o corpo de prova CP.3.NSP, sofreu 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 372 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 μe 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 kN acompanhada de 345 μe 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 foi 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 alojados 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 109 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 desce, 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.

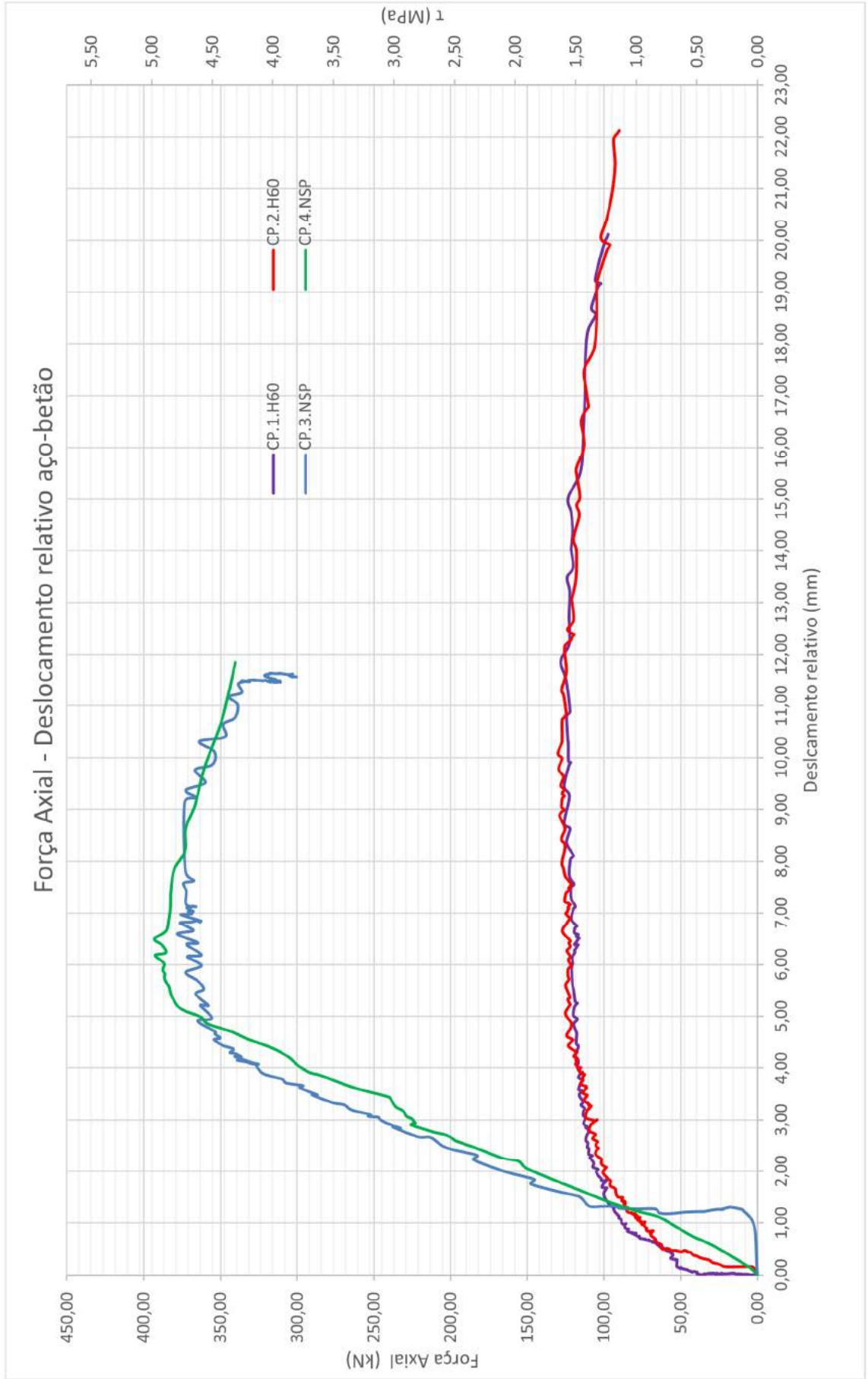


Figura 109 - Gráfico deslocamento relativo - força atuante / tensão tangencial τ

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 sollicitação 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, 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 retangular 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 retangular 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. Construíram-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 contruídos 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 viabilizá-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 contruídos 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

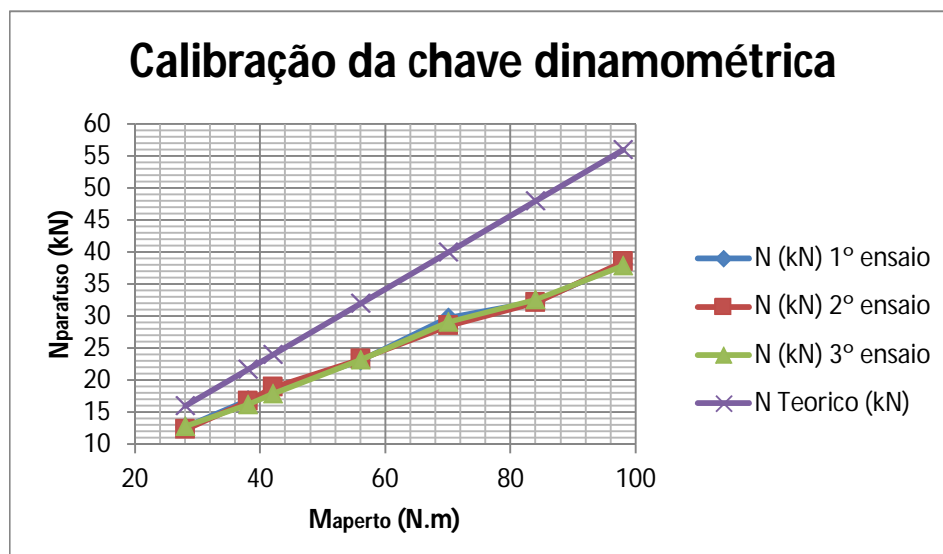
- [15] Daniels, B. J., Crisinel, M. "Composite slab behavior and strength analysis. Part II: Comparisons with test results and parametric analysis" *Journal of structural engineering*, ASCE 119-1 (1993): 36-49
- [16] ASCE Standard "Specifications for the design and construction of composite slabs" ASCE (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 triaxial 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

A Anexos

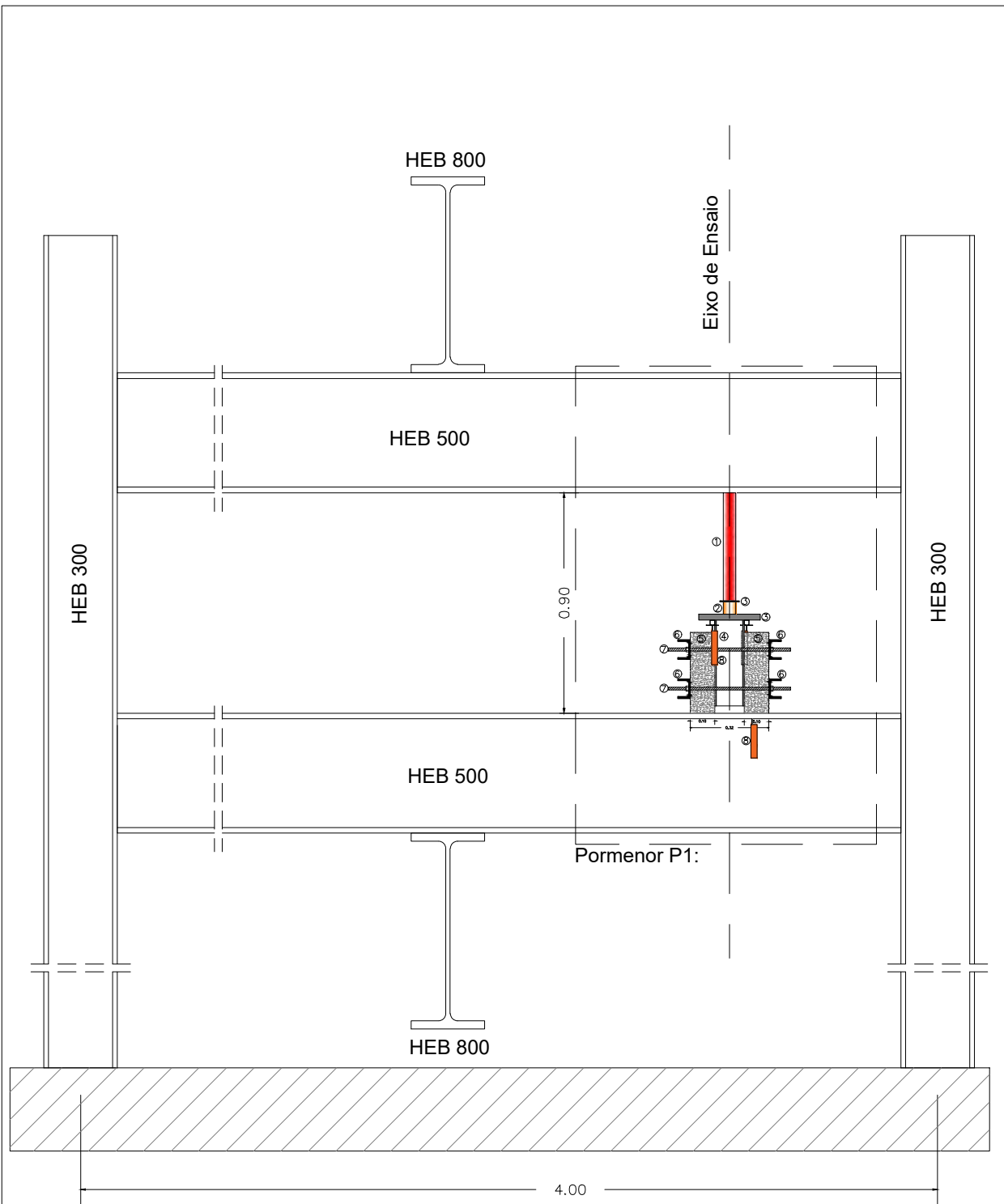
A.1 Calibração de pré-esforço em tirantes nas condições de ensaio

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



Calibração de pré-esforço

A.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

DESENHO Nº

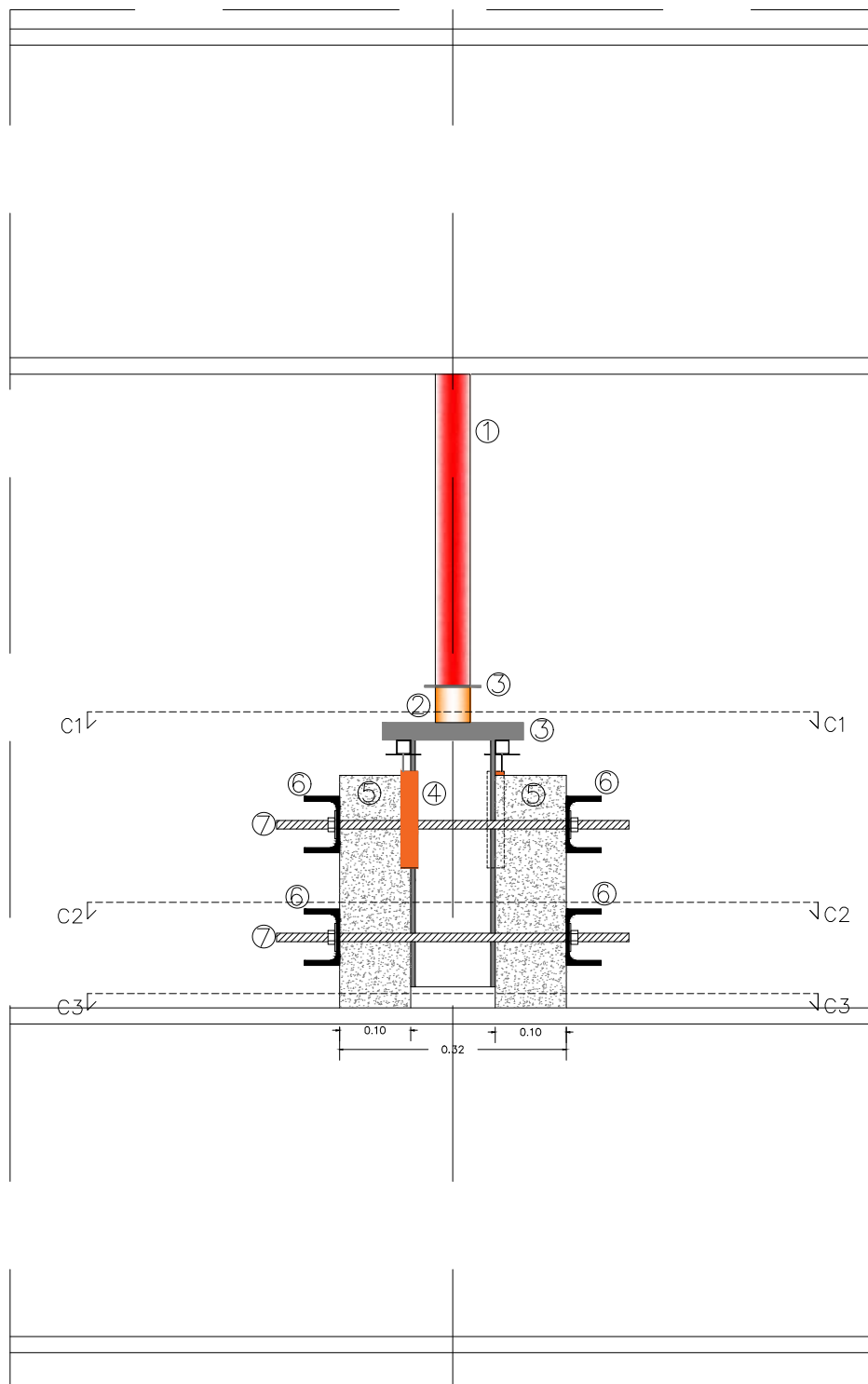
01

ESCALA:

1:25

REVISÃO Nº

00



Pormenor P1:

- 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:
Pormenor de montagem - P1

DATA:
JUNHO 2016

DESENHO Nº

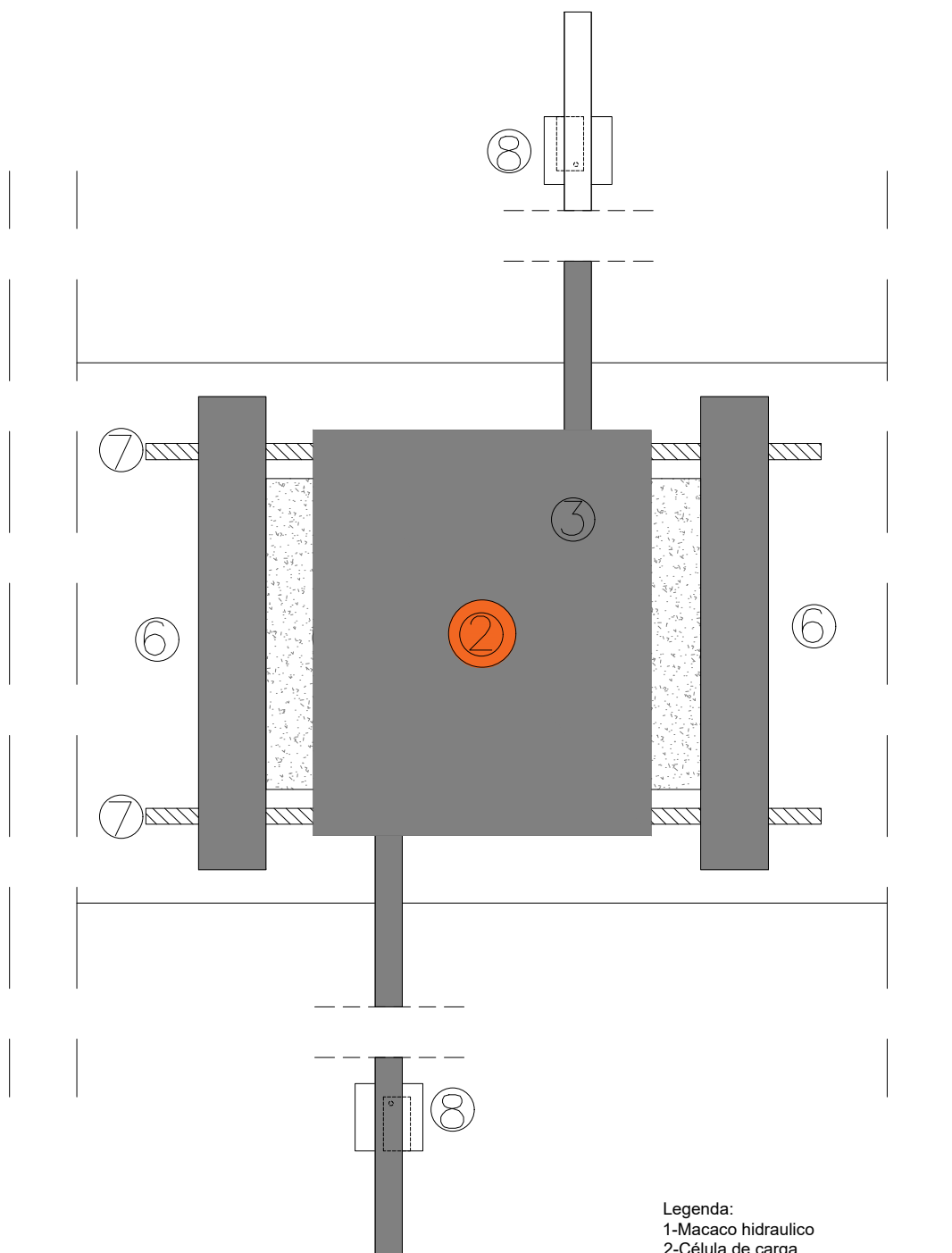
02

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

DESENHO Nº

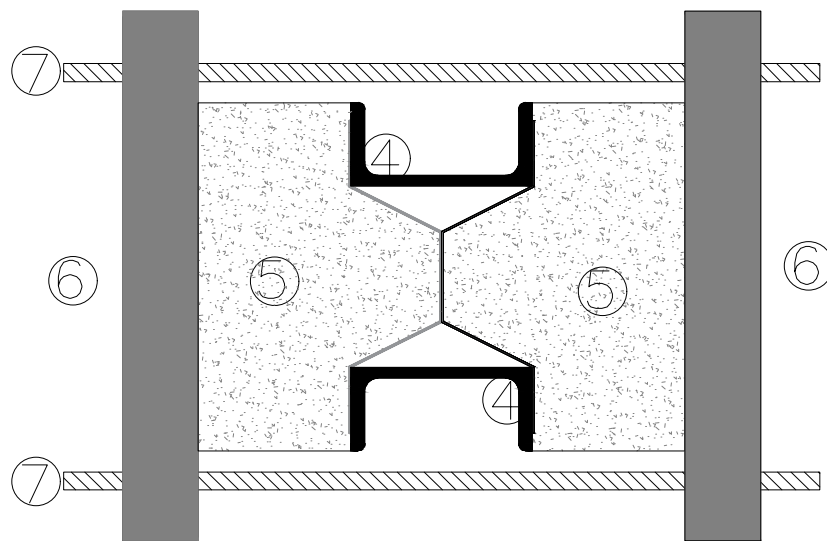
03

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

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 2

DATA:
JUNHO 2016

DESENHO Nº

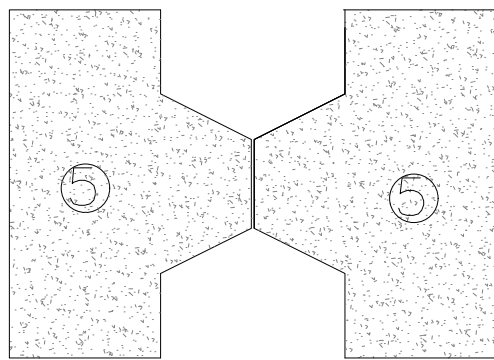
04

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 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	DESENHO N° 05
	ESCALA: 1:5	REVISÃO N° 00

A.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

A. 4 Informação técnica recolhida - primeira fase de ensaios

Corpo de prova CP.1.H60:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Ned (tirante) (kN)	m	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)	m	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

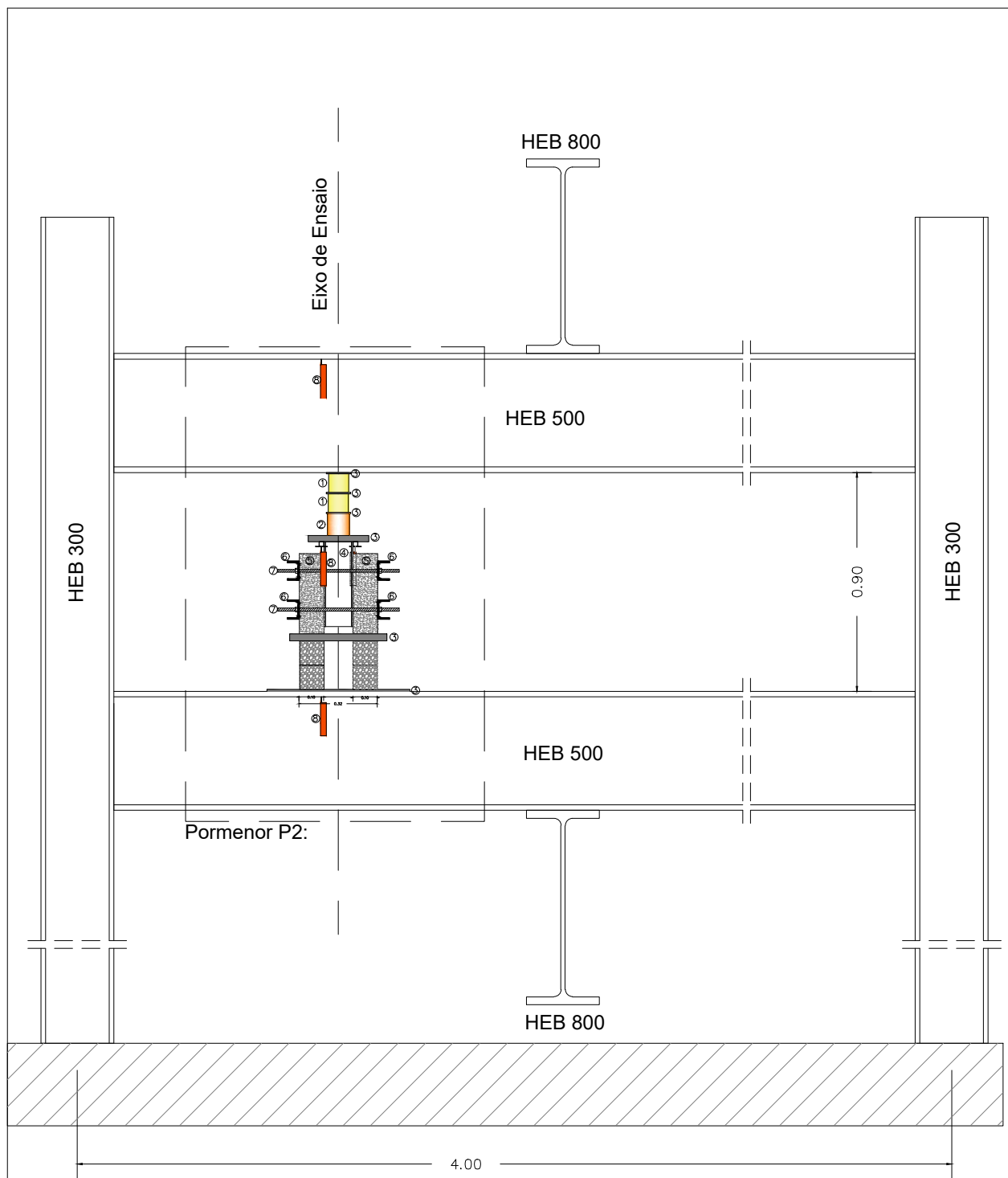
113,97	3,83	18,42	0,16	57,12	1,42
113,72	3,83	18,42	0,16	57,06	1,41
113,53	3,84	18,42	0,16	57,02	1,41
113,40	3,85	18,42	0,16	56,99	1,41
113,22	3,85	18,42	0,16	56,94	1,41
113,15	3,85	18,42	0,16	56,92	1,41
113,03	3,86	18,43	0,16	56,89	1,41
112,90	3,86	18,43	0,16	56,86	1,40
112,84	3,87	18,43	0,16	56,84	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

A.5 Montagem laboratorial - segunda 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)
 - 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

DESENHO Nº

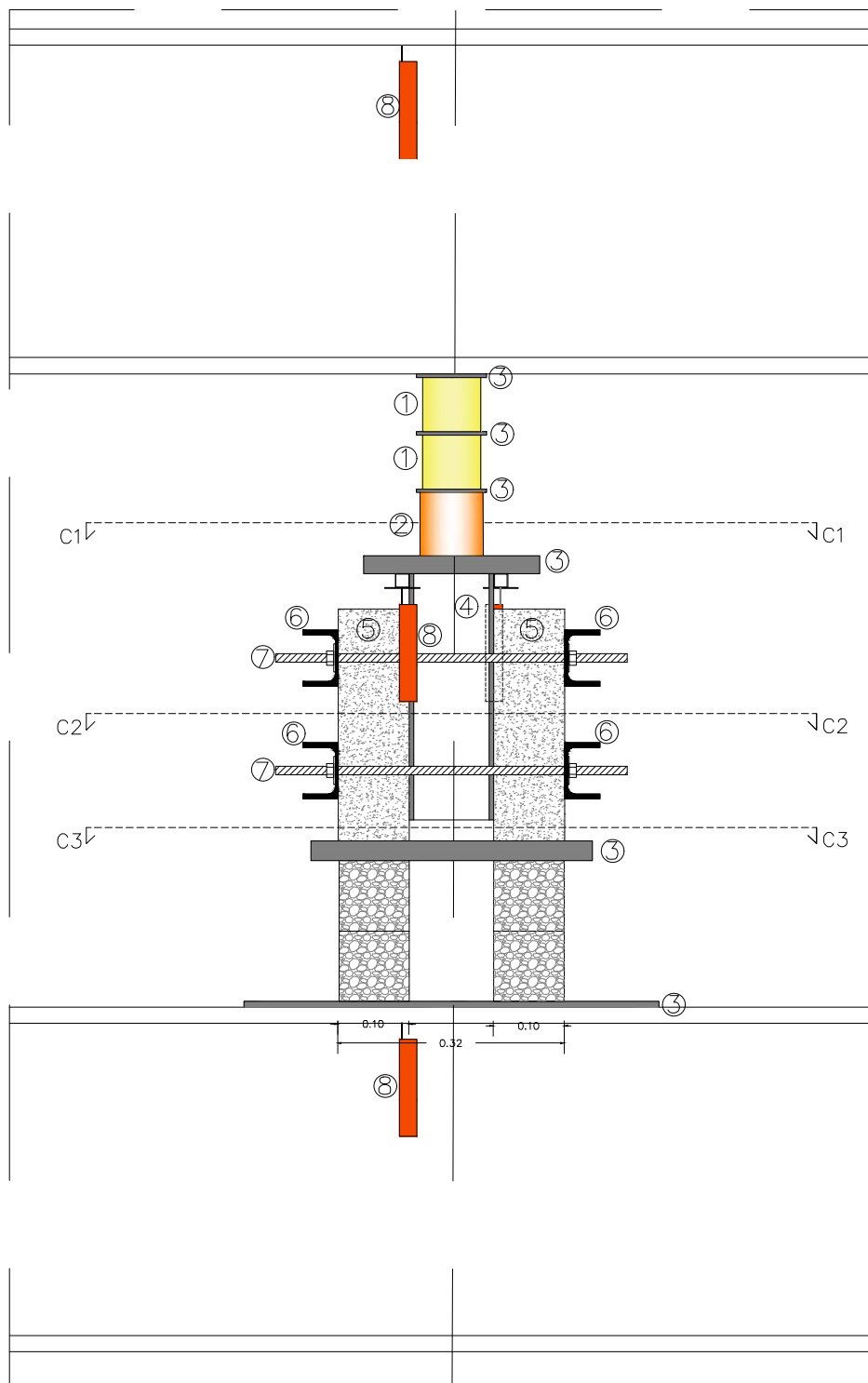
01

ESCALA:

REVISÃO Nº

1:25

00



Pormenor P2:

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:
Pormenor de montagem - P2

DATA:
JUNHO 2016

DESENHO Nº

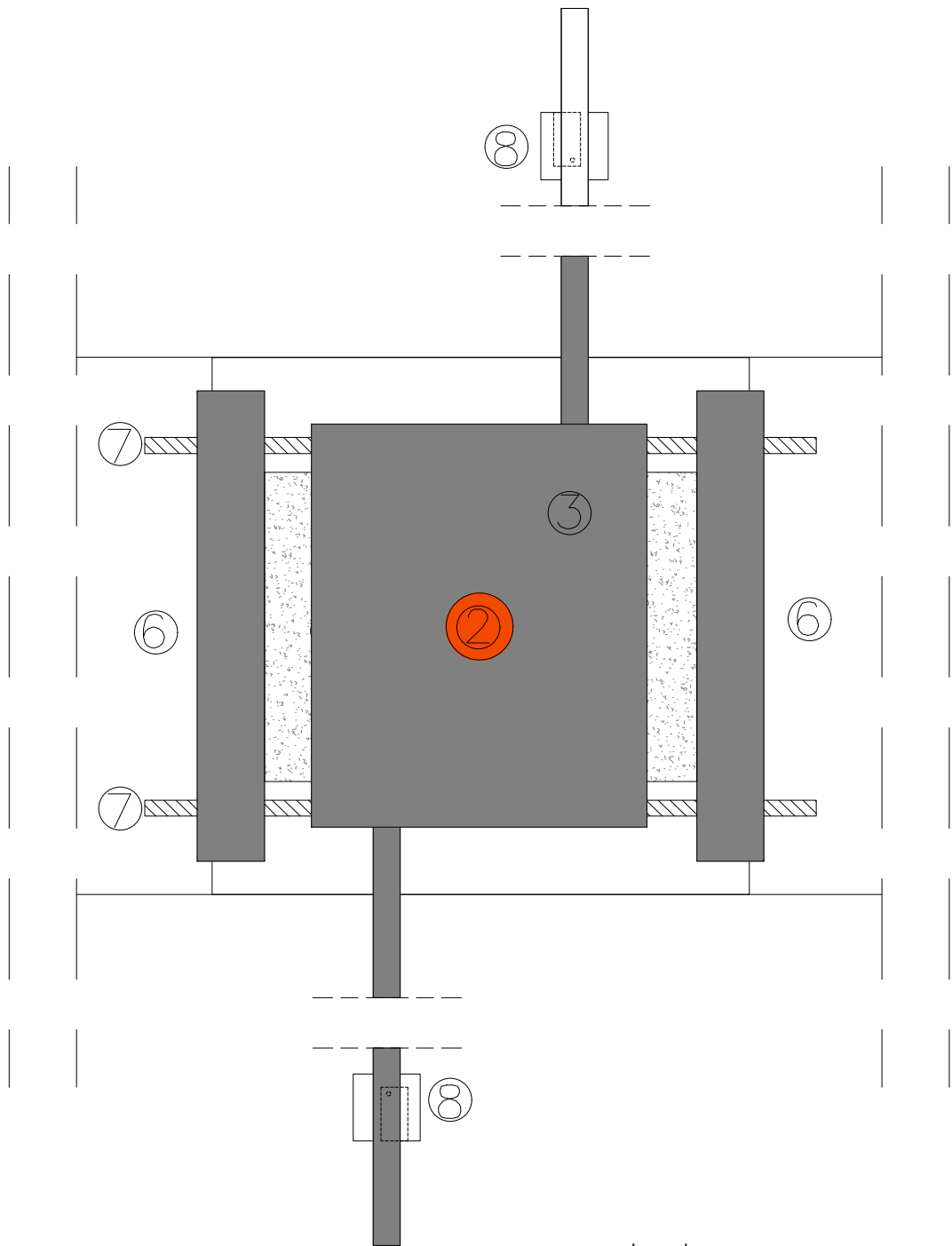
02

ESCALA:

1:10

REVISÃO Nº

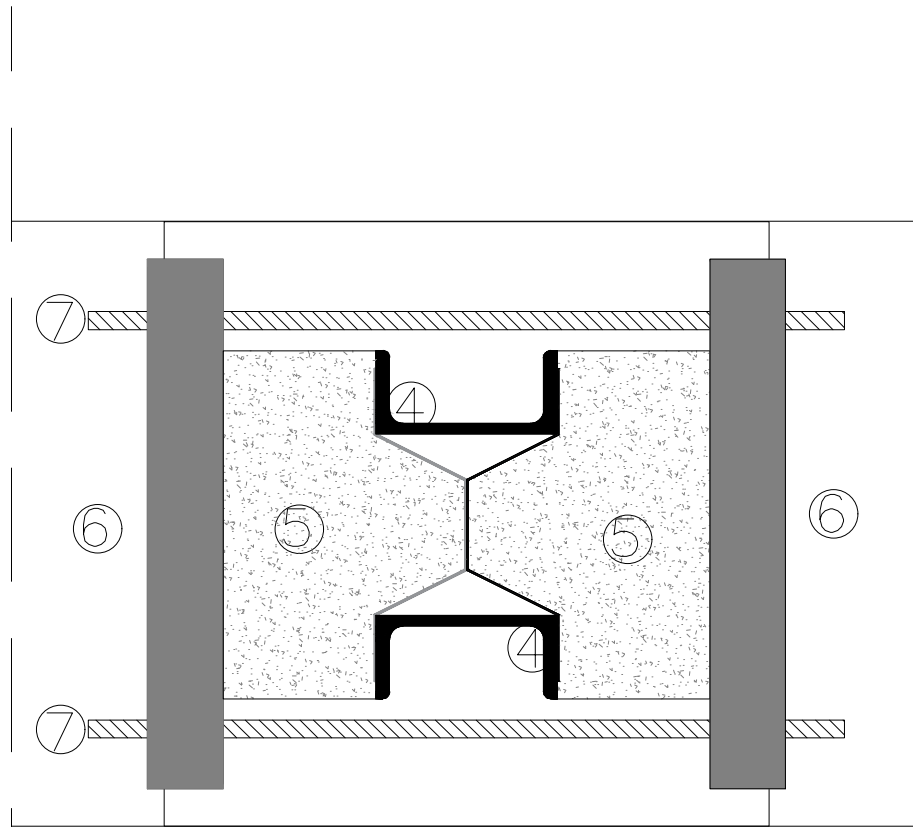
00



- 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



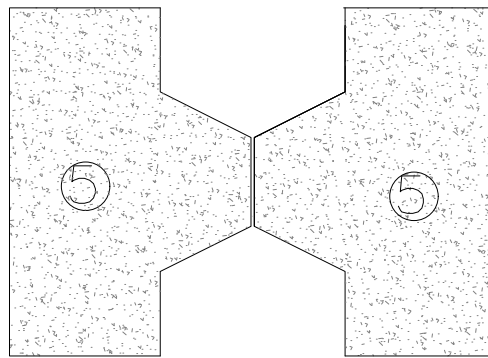
UBI- Universidade da Beira Interior	DATA: JUNHO 2016	DESENHO N°
DISCIPLINA: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil		03
TÍTULO DO TRABALHO: Lajes mistas de betão armado sobre chapa colaborante. Estudo da Interface	ESCALA:	REVISÃO N°
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 1	1:5	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	DESENHO N° 04
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	ESCALA:	REVISÃO N° 00
PEÇA: Corte da montagem laboratorial - C 2		1:5






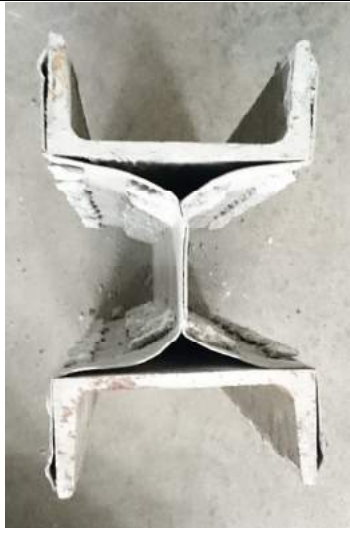







- Legenda:
- 1-Macaco hidraulico
 - 2-Célula de carga
 - 3 Chapa de aço
 - 4-Perfil UPN120
 - 5-Betão C25/30
 - 6-Perfil UPN80
 - 7-Varão Roscado Ø12
 - 8-Transdutor de deslocamentos (LVDT)
 - 9-Prismas em granito 100x100x200



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	DESENHO N° 05
	ESCALA: 1:5	REVISÃO N° 00

A.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>

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

A.7 Informação técnica recolhida - segunda fase de ensaios

Corpo de prova CP.3.NSP:

Ned (kN)	Deslocamento médio (mm)	Extensão média(me)	Ned (tirante) kN)	m	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 (me)	Pré - esforço (kN)	Ned (tirante) kN)	m	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