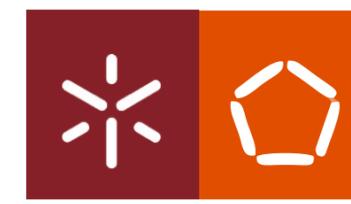


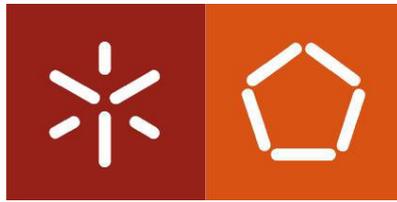


Ana Rita Rodrigues Neves

Desenvolvimento de novas soluções para pavimentos mistos de aço e betão

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





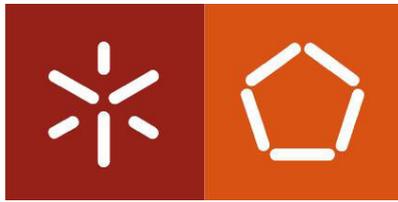
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ana Rita Rodrigues Neves

**Desenvolvimento de novas soluções para
pavimentos mistos de aço e betão**

5 de dezembro de 2016



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ana Rita Rodrigues Neves

**Desenvolvimento de novas soluções para
pavimentos mistos de aço e betão**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Maria Isabel Brito Valente

5 de dezembro de 2016

Agradecimentos

Queria expressar aqui o meu agradecimento a todas as pessoas que estiveram presentes ao longo do meu percurso académico e em particular na realização desta dissertação, pela compreensão e incentivo prestados.

Gostaria de agradecer especialmente aos meus pais, por me proporcionarem a oportunidade de realizar este percurso universitário, e também por todo afeto e atenção transmitidas.

Demonstro a minha sincera gratidão para com a Professora Isabel Valente, que sempre esteve presente durante a realização da minha dissertação, pelos conhecimentos partilhados, pela orientação, motivação, compreensão e disponibilidade.

Agradeço também ao Rui Gonçalves que sempre esteve presente ao longo destes anos, por todo carinho, paciência e amor.

À empresa O FELIZ deixo o meu agradecimento por toda a ajuda prestada na realização desta dissertação e por o auxílio na disponibilização e troca de informações.

Por último, um muito obrigado à minha família e a todos os amigos e colegas de curso, que tive o prazer de conhecer durante esta jornada, em particular à Manuela Silva, Joana Carvalho e ao José Carvalho. À Manuela Silva, o meu sentido e especial agradecimento, por a amizade, partilha de conhecimentos e ideias.

Resumo

Visando a construção económica de edifícios que utilizam pavimentos mistos em aço e betão, a presente dissertação tem como principal objetivo estudar o comportamento desse sistema de pavimentos, tirando o máximo partido dos dois materiais.

Esse sistema de viga mista congrega uma laje mista que é composta por uma chapa perfilada sobre a qual se betona a camada de betão, uma viga metálica formada por dois perfis “C” enformados a frio, e um conector metálico, que tem como principal função garantir a conexão entre a viga metálica e laje mista. A presença dos elementos de conexão tem por objetivo transmitir esforços de corte longitudinal que se desenvolvem entre a viga metálica e a laje e reduzir ou limitar o movimento relativo entre estes dois elementos.

O conector metálico aqui estudado será de dois tipos, um realizado com uma chapa nervurada do tipo Xadrez e outro realizado com uma chapa lisa recortada ou indentada. Após a betonagem da laje, a ligação entre os dois materiais, aço e betão, será garantida por um destes dois tipos de conectores.

Para estudar o comportamento do sistema misto sujeito à flexão foi inicialmente desenvolvida uma Ferramenta de Cálculo no *software Microsoft Excel*, que permitiu a realização de uma análise paramétrica às dimensões da viga metálica, do conector e da laje de betão e ainda uma análise paramétrica ao caso de um sistema idêntico com laje maciça. Esta ferramenta de cálculo foi validada tendo em conta cálculos realizados manualmente e também cálculos automáticos realizados a partir da própria Ferramenta, considerando a variação sucessiva das posições do eixo neutro.

Posteriormente, recorreu-se ao *software Atena 3D* onde foram construídos modelos numéricos representativos das vigas mistas com os dois tipos de conectores. Após a construção destes modelos, realizou-se uma análise de sensibilidade, através da variação de diversos parâmetros. Essa análise permitiu perceber a influência de parâmetros relevantes no comportamento dos modelos testados e tirar conclusões quanto ao comportamento esperado durante a realização dos ensaios experimentais.

Por fim, modelou-se os provetes das vigas mistas com os dois tipos de conectores, para futuros ensaios à flexão e para ensaios do tipo *push-out*, utilizando para o efeito o *software Tekla Structures*. Os modelos desenvolvidos no *software Tekla Structures* têm por objetivo servir de apoio ao fabrico das peças metálicas, à colocação de armaduras, ao fabrico e colocação de cofragens, à betonagem e ainda à montagem do *setup* dos ensaios e realização dos mesmos.

Palavras-Chave: vigas mistas em aço e betão, sistemas mistos, perfis enformados a frio, chapa perfilada, conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, conector de chapa lisa do tipo Indentado, Ferramenta de Cálculo, análise numérica, modelação.

Abstract

This dissertation aims to study the behaviour of a steel and concrete composite flooring system that takes full advantage of both materials and provides an economic construction system.

This composite beam system gathers a composite slab, a metallic beam formed by two cold-formed "C" profiles and a steel connector, which has the main function of connecting the steel beam and the composite slab. The composite slab includes a profiled deck on which the concrete layer is concreted and steel reinforcement. The presence of the connecting elements guarantees the transmission of longitudinal shear forces that are developed between the steel beam and slab and reduces or limits slip between these two elements.

The metal connectors in study are of two types. The first one is made with a ribbed flat plate and another with an indented flat plate. After concreting the slab, the connection between the two materials, steel and concrete, is ensured by one of these two types of connectors.

A calculation tool was initially developed in the *Microsoft Excel* software, in order to study the proposed composite system when subjected to bending behaviour. The use of the calculation tool allowed for a parametric analysis on the dimensions of the steel beam, of the steel connector and of the composite slab. An identical parametric analysis was also developed on a similar system with a slab of constant thickness. This tool was validated by taking into account calculations performed manually and also automatic calculations performed with the tool itself, by considering the successive variation of the neutral axis position.

Later, the author used the Athena 3D software to build representative numerical models of composite beams with two types of connectors. After the construction of these models, a sensitivity analysis was developed, by varying several parameters. This sensitivity analysis provided data to understand the influence of relevant parameters on the behaviour of the tested models and to draw conclusions about the expected behaviour during the performance of experimental tests.

Finally, the composite beams specimens were modelled with two types of connectors for future bending tests and push-out tests, using the Tekla Structures software for this purpose. The models developed in Tekla Structures software were designed to provide support to the manufacture of metal parts, placing of reinforcement, the manufacture and placement of scaffolding, the concreting and also the assembly and setup of tests.

Keywords: steel and concrete composite beams, composite flooring systems, cold-formed steel profiles, profiled plate, ribbed plate connector, indented flat plate connector, Calculation Tool, numerical analysis, modelling.

CAPÍTULO 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
Estado de Conhecimento	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 O aço.....	6
2.3 Perfis enformados a frio	8
2.3.1 Tipos de perfis	9
2.3.2 Comportamento/desempenho estrutural	10
2.4 Vigas mistas em aço e betão.....	13
2.5 Lajes mistas de aço e betão.....	14
2.5.1 Tipos de chapas	16
2.6 Sistemas mistos	16
2.6.1 Sistema proposto por Hsu, Punurai, Punuri, & Majdi, (2014) e por Majdi, Hsu, & Zarei, (2014).....	17
2.6.2 Sistema proposto por Hsu et al., (2014) e por Majdi et al., (2014).....	19
2.6.3 Sistema proposto por Irwan, Hanizah, Azmi, & Koh, (2011) e por M.Irwan, Hanizah, & Azmi, (2009).....	20
2.6.4 Sistema proposto por Ruiz, (2009).....	23
CAPÍTULO 3.....	25
Ferramenta de Cálculo	25
3.1 Estrutura da ferramenta	26

3.2	Parâmetros.....	27
3.3	Perfis “C” enformados a frio.....	27
3.4	Chapas perfiladas enformadas a frio	28
3.5	Dados das vigas mistas	29
3.6	Cálculo das características plásticas da secção transversal.....	32
3.6.1	Forças aplicadas na laje de betão	34
3.6.2	Forças aplicadas no perfil de secção “C”	36
3.6.3	Forças aplicadas na chapa do conector	38
3.7	Profundidade do eixo neutro (cálculo plástico)	43
3.8	Momento plástico resistente.....	47
3.9	Seleção das hipóteses de cálculo.....	58
3.10	Cálculo das características elásticas da secção transversal	60
3.11	Cálculo da deformação.....	64
3.12	Cálculo do tipo de conexão.....	65
3.12.1	Esforço rasante	65
3.12.2	Resistência ao corte do conector Indentado	66
3.12.3	Resistência ao corte do conector Xadrez	69
3.13	Explicação do funcionamento da ferramenta.....	71
3.14	Validação da Ferramenta de Cálculo	73
3.14.1	Validação manual.....	74
3.14.2	Validação informática/automática	75
3.15	Estudo paramétrico	76
3.15.1	Modelo base	76
3.15.2	Modelos desenvolvidos a partir de alterações no Modelo Base	79
	CAPÍTULO 4.....	89
	Modelo Numérico	89
4.1	Modelo base	89
4.1.1	Materiais.....	90
4.1.2	Geometria.....	94

4.1.3	Definição das superfícies de contacto	101
4.1.4	Condições de apoio e carregamento	104
4.1.5	Definição e refinamento da malha.....	106
4.1.6	Sequência de carregamentos e parâmetros de solução	113
4.1.7	Pontos de monotorização.....	115
4.2	Análise de sensibilidade	116
4.2.8	Modelo 1: modelo base	116
4.2.9	Modelo 2 e Modelo 3: modelo base com conector Indentado + alteração das superfícies de contacto entre o conector Indentado e a laje de betão	123
4.2.10	Modelo 4 até Modelo 15: modelo base com conector Xadrez + criação de um novo material para a interface conector – laje de betão	141
4.2.11	Comparação dos modelos da viga mista com conector Xadrez com os modelos da viga mista com conector Indentado	155
CAPÍTULO 5.....		157
Caracterização Geométrica dos Provetes		157
5.1	Modelo 3D.....	157
5.1.1	Provetes para o ensaio de viga mista	158
5.1.2	Provetes para o ensaio <i>push-out</i>	169
5.2	Produção	177
5.2.1	Desenhos dos provetes	177
5.2.2	Análise de quantidades	179
CAPÍTULO 6.....		181
Conclusão		181
6.1	Considerações finais	181
6.2	Desenvolvimentos futuros	183
Referências Bibliográficas		185
Sites Consultados.....		189
ANEXOS		191

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Composição de uma laje mista	2
Figura 1.2 - Conector de chapa lisa indentada do tipo <i>Crestbond</i>	2
Figura 1.3 - Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez. (adaptado de J. Soares Correia, n.d.; António de Oliveira Borges, 2016; José Peixoto Rodrigues, 2016).....	2
Figura 2.1 - Diagrama do comportamento do aço à tração. (adaptado de NP EN 1992-1-1: 2010, 2010).....	7
Figura 2.2 - Secções tipo de perfis enformados a frio. (Moreira, 2012)	10
Figura 2.3 - Esquema das secções transversais. (adaptado de Laim & Rodrigues, 2011b)	10
Figura 2.4 – Instabilidade lateral-torsional das vigas “C”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a).....	11
Figura 2.5 – Instabilidade lateral-distorcional das vigas I-enrijecidas: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a).....	11
Figura 2.6 – Instabilidade local e distorcional das vigas “R”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a).....	12
Figura 2.7 – Instabilidade distorcional do perfil “U” das vigas “2R”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a).....	12
Figura 2.8 – Solução para as vigas com secção “2R”, com a utilização de perfis “U” enrijecidos nas extremidades dos banzos. (adaptado de Laim & Rodrigues, 2011a)	13
Figura 2.9 - Interação parcial e interação total.	13
Figura 2.10 - Nervura reentrante e nervura aberta.....	15
Figura 2.11 - Secções-tipo de chapas perfiladas. (Moreira, 2012).....	16
Figura 2.12 - Solução mista com conectores de formato trapezoidal (vista de corte e vista lateral). (Majdi et al., 2014)	17
Figura 2.13 – Solução simples, sem conectores de formato trapezoidal (corte transversal). (adaptado de Majdi et al., 2014).....	17
Figura 2.14 – Gráfico de carga versus deformação a meio vão, para os provetes CB3 e CB4. (Hsu et al., 2014)	18

Figura 2.15 – Modos de rotura: (a) Sistema simples sem os conectores de formato trapezoidal, com rotura com encurvadura do banzo superior do perfil; (b) Sistema misto com os conectores de formato trapezoidal com rotura dúctil. (Hsu et al., 2014)	19
Figura 2.16 - Conector de secção trapezoidal com dobras. (Hsu et al., 2014).....	19
Figura 2.17 - Gráfico de carga versus deformação a meio vão, para os provetes CB4 e CB5. (Hsu et al., 2014).....	20
Figura 2.18 – Sistema misto com BTTST: (a) Antes da betonagem da laje; (b) Após betonagem da laje. (Irwan et al., 2011)	21
Figura 2.19 - Conexão BTTST. (adaptado de Irwan et al., 2011)	21
Figura 2.20 – Conexão LYL B. (M.Irwan et al., 2009)	22
Figura 2.21 - Corte triangular e dobragem no banzo superior do perfil (BTTST). (Irwan et al., 2011)	22
Figura 2.22 - Elemento estrutural com conexão por encaixe. (adaptado de RUIZ, 2009)	23
Figura 3.1 - a) Características geométricas para o perfil de secção em "C"; b) Características geométricas para a solução mista; c) Características geométricas para a chapa perfilada.	26
Figura 3.2 - Chapa perfilada. a) Chapa paralela a viga; b) Chapa transversal à viga. (adaptado de NP EN 1994-1-1, 2011)	28
Figura 3.3 - Introdução de dados gerais na Ferramenta de Cálculo.....	30
Figura 3.4 - Introdução dos dados do vão e do carregamento.	31
Figura 3.5 - Esforços atuantes calculados na Ferramenta de Cálculo.....	31
Figura 3.6 – Esquema do ensaio e esforços atuantes.	31
Figura 3.7 - Forças plásticas aplicadas ao longo de toda a secção transversal da viga mista selecionada.	34
Figura 3.8 - Força de compressão total no betão e força de compressão no betão correspondente ao espaço que o conector ocupa na parcela maciça de betão.....	34
Figura 3.9 - Força de compressão total do betão sem o conector intercalar a laje maciça de betão.	35
Figura 3.10 - Força de compressão no betão acima do conector quando o e.n. atravessa a laje maciça de betão.....	36
Figura 3.11 - Força de tração total dos perfis com secção "C".	37
Figura 3.12 – Força de compressão nos banzos superiores dos perfis com secção "C".	37
Figura 3.13 - Força de compressão nas abas superiores dos perfis com secção "C".	38
Figura 3.14 - Força de tração total da chapa do conector.	39

Figura 3.15 - Força de tração da chapa do conector na altura total do perfil de secção "C"	39
Figura 3.16 - Força de tração da chapa do conector na altura abaixo das abas superiores do perfil de secção "C"	40
Figura 3.17 – Força de tração (ou de compressão) na chapa do conector, na altura das abas superiores do perfil de secção "C"	41
Figura 3.18 - Força de compressão da chapa do conector na altura da espessura dos banzos superiores do perfil de secção "C"	41
Figura 3.19 - Força de compressão da chapa do conector na altura da chapa perfilada.....	42
Figura 3.20 - Força de compressão da chapa do conector no interior da espessura da laje de betão.	43
Figura 3.21 - Caso A.1: eixo neutro na laje de betão, acima do conector.	48
Figura 3.22 - Caso A.2: eixo neutro na laje de betão, atravessando o conecor.	48
Figura 3.23 - Caso A.3: eixo neutro na chapa perfilada.	49
Figura 3.24 - Caso A.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C"	50
Figura 3.25 - Caso A.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C"	50
Figura 3.26 - Caso A.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.	51
Figura 3.27 - Caso B.1: eixo neutro na laje de betão.....	52
Figura 3.28 - Caso B.3: eixo neutro na chapa perfilada.	52
Figura 3.29 - Caso B.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C"	53
Figura 3.30 - Caso B.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C"	53
Figura 3.31 - Caso B.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.	54
Figura 3.32 - Caso C.1: eixo neutro na laje de betão.....	54
Figura 3.33 - Caso C.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C"	55
Figura 3.34 - Caso C.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C"	57
Figura 3.35 - Caso C.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.	58
Figura 3.36 - Apresentação final dos resultados das características plásticas.....	60
Figura 3.37 - Caso A: eixo neutro na laje de betão	61
Figura 3.38 - Caso B: eixo neutro na chapa perfilada.	63
Figura 3.39 - Caso C: eixo neutro no perfil.....	64
Figura 3.40 - Apresentação final dos resultados das características elásticas.	64
Figura 3.41 - Apresentação final dos resultados da deformação máxima a meio vão.	65
Figura 3.42 - Apresentação final dos resultados do esforço rasante (conexão não dúctil).....	66
Figura 3.43 – Área considerada para a abertura do conector.	68

Figura 3.44 - Apresentação final dos resultados da resistência ao corte do conector Indentado.	68
Figura 3.45 – Esquema de ensaio <i>setup</i> . (Thomann & Lebet, 2007).....	69
Figura 3.46 – Disposições possíveis para a chapa nervurada do tpo Xadrez. (Thomann & Lebet, 2007)	70
Figura 3.47 - Apresentação final dos resultados da resistência ao corte do conector Xadrez.	71
Figura 3.48 - Dados selecionados para a validação da ferramenta desenvolvida. (a) Dados da carga e do vão; (b) Esforços atuantes, para a carga e vão impostos.	74
Figura 3.49 - Dados gerais escolhidos, para a validação da ferramenta desenvolvida.	75
Figura 3.50 - Encaixe da chapa perfilada.....	77
Figura 3.51 - a) Solução adotada do modelo base para o perfil de secção em "C"; b) Solução adotada do modelo base para a laje de betão e para a chapa do conector; c) Solução adotada do modelo base para a chapa perfilada.	78
Figura 3.52 - Solução de vão e carregamento adotada para o modelo base.	78
Figura 3.53 - Momento plástico resistente e profundidade do eixo neutro calculado pela ferramenta desenvolvida para o modelo base.	79
Figura 3.54 - Verificação das tensões do aço e do betão calculadas na ferramenta desenvolvida para o modelo base.....	79
Figura 3.55 – Evolução do momento plástico resistente em função da largura da laje.	84
Figura 3.56 - Evolução do momento plástico resistente em função da espessura da laje.....	84
Figura 3.57 - Evolução do momento plástico resistente em função da geomtria dos perfis “C”.	85
Figura 3.58 - Evolução do momento plástico resistente em função da altura da chapa do conector.....	85
Figura 3.59 - Evolução do momento plástico resistente em função da altura total da laje.....	86
Figura 4.1 - Lei constitutiva definida no <i>Software ATENA 3D</i> para os perfis com secção transversal em “C”.	91
Figura 4.2 - Leis constitutivas definidas no <i>Software ATENA 3D</i> para os conectores utilizados.	92
Figura 4.3 - Leis constitutivas definidas no <i>Software ATENA 3D</i> para as chapas metálicas e armaduras.	92
Figura 4.4 - Lei constitutiva definida no <i>Software ATENA 3D</i> para a laje de betão.....	93
Figura 4.5 - Perfil com secção "C" equivalente.	95

Figura 4.6 - Geometria da viga metálica e geometria do conector Xadrez no <i>Software ATENA 3D</i>	96
Figura 4.7 - Geometria do conector Indentado no <i>Software ATENA 3D</i>	96
Figura 4.8 - Geometria da laje de betão nervurada com o conector Indentado no <i>Software ATENA 3D</i>	97
Figura 4.9 - Geometria da laje de betão nervurada com o conector Xadrez no <i>Software ATENA 3D</i>	97
Figura 4.10 – Geometria da laje de betão maciça com o conector Indentado no <i>Software ATENA 3D</i>	98
Figura 4.11 - Geometria da laje de betão maciça com o conector Xadrez no <i>Software ATENA 3D</i>	98
Figura 4.12 - Geometria das chapas metálicas no <i>Software ATENA 3D</i> : (a) Viga mista com laje de betão nervurada; (b) Viga mista com laje de betão maciça.	99
Figura 4.13 - Disposição em planta da armadura.	101
Figura 4.14 - Disposição transversal da armadura.	101
Figura 4.15 - Geometria da armadura no programa de cálculo <i>ATENA 3D</i> : (a) Viga mista com laje de betão nervurada; (b) Viga mista com laje de betão maciça.	101
Figura 4.16 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector do tipo Indentado e laje nervurada.	102
Figura 4.17 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector do tipo Xadrez e laje nervurada.	103
Figura 4.18 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector de chapa lisa do tipo Indentado de laje maciça.	103
Figura 4.19 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector do tipo Xadrez e laje maciça.	104
Figura 4.20 - Casos de carga definidos no <i>Software ATENA 3D</i>	104
Figura 4.21 - Condições de simetria para as vigas mistas analisadas: (a) Plano transversal de simetria (YZ); (b) Plano longitudinal de simetria (XZ).	105
Figura 4.22 – Viga mista de laje nervurada: (a) Condição de carregamento; (b) Condição de apoio.	106
Figura 4.23 - Viga mista de laje maciça: (a) Condição de carregamento; (b) Condição de apoio.	106

Figura 4.24 - Exemplo de um elemento linear e de um elemento quadrático. (Červenka & Procházková, 2014).....	106
Figura 4.25 - Tipos de malha definidos na viga mista com laje nervurada e conector do tipo Indentado.....	108
Figura 4.26 - Tipos de malha definidos na viga mista com laje nervurada come conector do tipo Xadrez.	109
Figura 4.27 - Tipos de malha definidos na viga mista de laje nervurada com conector do tipo Indentado.....	111
Figura 4.28 - Tipos de malha definidos na viga mista de laje maciça com conector do tipo Xadrez.	112
Figura 4.29 - Histórico de carregamentos apresentado pelos vários incrementos de carga no programa de cálculo ATENA 3D.....	113
Figura 4.30 - Condições de convergência associadas ao método de <i>Newton-Raphson</i>	114
Figura 4.31 - Condições de convergência associadas ao método de <i>Arc length</i>	114
Figura 4.32 - Pontos de monotorização definidos no modelo numérico	115
Figura 4.33 - Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.	117
Figura 4.34 – Fase inicial da curva força-deformação a meio vão do Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.	117
Figura 4.35 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.....	119
Figura 4.36 - Tensões Principais no Modelo 1A com laje nervurada e conector Xadrez (em MPa).....	121
Figura 4.37 – Tensões Principais no Modelo 1A com laje maciça e conector Xadrez (em MPa).	122
Figura 4.38 - Tensões Principais no conector Xadrez do Modelo 1A (em MPa).	122
Figura 4.39 - Modelo 1B: viga mista com conector do tipo Indentado.	123
Figura 4.40 - Superfícies de contacto do Modelo 2, para a viga mista de laje nervurada com conector Indentado.	124
Figura 4.41 - Superfícies de contacto do Modelo 2, para a viga mista de laje maciça com conector Indentado.....	125
Figura 4.42 - Superfícies de contacto do Modelo 3, para a viga mista de laje nervurada com conector Indentado.	125

Figura 4.43 - Superfícies de contacto do Modelo 3, para a viga mista de laje maciça com conector Indentado.	126
Figura 4.44 - Modelo 2: viga mista com conector do tipo Indentado.	126
Figura 4.45 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 2 com conector do tipo Indentado.	129
Figura 4.46 - Tensões Principais no Modelo 2 com laje nervurada e conector Indentado (em MPa).	131
Figura 4.47 – Tensões Principais no Modelo 2 com laje maciça e conector Indentado (em MPa).	132
Figura 4.48 - Tensões Principais no conector Indentado do Modelo 2 (em MPa).	133
Figura 4.49 - Modelo 3: viga mista com conector do tipo Indentado.	134
Figura 4.50 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 3 com conector do tipo Indentado.	136
Figura 4.51 - Tensões Principais no Modelo 3 com laje nervurada e conector Indentado (em MPa).	138
Figura 4.52 – Tensões Principais no Modelo 3 com laje maciça e conector Indentado (em MPa).	139
Figura 4.53 - Tensões Principais no conector Indentado do Modelo 3 (em MPa).	140
Figura 4.54 - Resultados dos Modelos 1B, 2 e 3 da viga mista com conector do tipo Indentado.	141
Figura 4.55 – Área de contacto do conector em mm. (adaptado de Diógenes et al., 2015) ...	143
Figura 4.56 – Curva força-deslocamento para cada nível de tensão de compressão considerado e para os provetes com chapa do tipo R1. (Thomann & Lebet, 2007)	144
Figura 4.57 – Esquema de ensaio e geometria dos provetes. (adaptado de Thomann & Lebet, 2007).....	144
Figura 4.58 – Material de interface laje-conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, definido no <i>Software ATENA 3D</i>	145
Figura 4.59 - Resultados dos Modelos 4 até 8, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.	146
Figura 4.60 - Resultados dos Modelos 4 até 8, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje maciça.	147

Figura 4.61 – Tensões na Interface dos modelos numéricos com conector Xadrez, de rigidez tangencial constante igual a $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ e coesão igual a 1,5 MPa.	148
Figura 4.62 - Resultados dos Modelos 9 até 13, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.	149
Figura 4.63 - Resultados dos Modelos 9 até 13, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje maciça.	150
Figura 4.64 - Modelos 1 e 14: viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada. (preto contínuo – $K_t=2000,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$, preto descontínuo – sem material de interface)	151
Figura 4.65 - Modelos 4, 9, 14 e 15, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.	152
Figura 4.66 – Modelos da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelo 14: $C = 4 \text{ MPa}$).	153
Figura 4.67 – Fase inicial das curvas força-deslocamento dos Modelos da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelo 14: $C = 4 \text{ MPa}$).	153
Figura 4.68 - Modelos da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$).	154
Figura 4.69 – Fase inicial das curvas força-deslocamento dos Modelos da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$).	154
Figura 4.70 - Modelos 1A, 2, 14 e 9 da viga mista com laje nervurada.	155
Figura 4.71 - Modelos 1A e 2 da viga mista com laje maciça.	156
Figura 5.1 - Provete 1, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.	159
Figura 5.2 - Provete 1 sem laje de betão, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.	159
Figura 5.3 - Provete 2, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.	160
Figura 5.4 - Provete 2 sem laje de betão, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.	160
Figura 5.5 - Viga metálica dupla de secção “C”	161
Figura 5.6 - Chapa de base nos apoios e nervuras laterais.	162
Figura 5.7 - Encaixe do conector de chapa lisa Indentado com a chapa perfilada.	163
Figura 5.8 - Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.	163
Figura 5.9 - Conector de chapa lisa do tipo Indentado.	164
Figura 5.10 - Chapa perfilada.	164

Figura 5.11 - Laje de betão	165
Figura 5.12 - Parafusos auto roscantes e auto perfurantes	166
Figura 5.13 - Disposição em planta da armadura realizada no <i>Software Tekla Structural</i>	167
Figura 5.14 - Disposição transversal da armadura realizada no <i>Software Tekla Structural</i> ...	167
Figura 5.15 – Disposição e medidas das cofragens.	168
Figura 5.16 – Medidas dos travamentos com forma de “L”.....	168
Figura 5.17 – Disposição das cofragens com os travamentos em forma de “L”.....	169
Figura 5.18 - Provete 3, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.....	169
Figura 5.19 - Provete 4, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.....	170
Figura 5.20 – Perfil HEB 260: (a) Provete 3; (b) Provete 4.	171
Figura 5.21 - Conectores dos provetes 3 e 4: (a) Provete 3: Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez; (b) Provete 4: Conector de chapa lisa do tipo Indentado.	172
Figura 5.22 – Provete 3 e 4 sem laje de betão.: (a) Provete 3: Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez; (b) Provete 4: Conector de chapa lisa do tipo Indentado.....	172
Figura 5.23 – Laje de betão dos provetes push-out: (a) Provete 3; (b) Provete 4.	173
Figura 5.24 - Disposição da armadura para os provetes 3 e 4.	174
Figura 5.25 – Cofragem para o Provete 3.....	175
Figura 5.26 – Cofragem para o Provete 4.....	176
Figura 5.27 – Imagem 3D da cofragem dos Provetes 3 e 4.....	176
Figura 5.28 – Provete 2 com conector de chapa lisa do tipo Indentado, para ensaio.	177
Figura 5.29 – Pormenores construtivos: (a) Soldadura das chapas metálicas; (b) Parafusos auto roscantes e auto perfurantes.....	177
Figura 5.30 - Vista transversal dos Provetes 1 e 2.	178
Figura 5.31 – Provetes para o ensaio <i>push-out</i> : (a) Provete 3; (b) Provete 4.	178
Figura 5.32 – Malha sol de $\phi 8//0,100$ transversalmente e de $\phi 6,5//0,150$ longitudinalmente.	179
Figura 5.33 – Marcação e corte da malha sol.	179

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Tipo de formas do aço e sua utilização na construção. (adaptado de Valente, 2016)	6
Tabela 3.1 - Hipóteses de cálculo para as características plásticas da secção transversal mista.	33
Tabela 3.2 - Condições para a determinação da posição do eixo neutro para as hipóteses inseridas nos Casos A, B e C.....	59
Tabela 3.3 - Legenda de cores da Ferramenta de Cálculo.....	72
Tabela 3.4 - Explicação esquemática do funcionamento da Ferramenta de Calculo	73
Tabela 3.5 – Dados geométricos dos vários modelos considerados.....	81
Tabela 3.6 - Resultados principais obtidos nos vários modelos considerados.	82
Tabela 3.7 – Posição do eixo neutro plástico e elástico para os vários modelos considerados.	83
Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros considerados na definição das leis constitutivas definidas no <i>Software ATENA 3D</i>	94
Tabela 4.2 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Indentado.	108
Tabela 4.3 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez.....	110
Tabela 4.4 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje maciça e conector do tipo Indentado.	111
Tabela 4.5 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez.....	112
Tabela 4.6 - Características impostas aos pontos de monotorização.....	116

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Desde o início da história da construção civil que o homem se preocupa com a otimização do processo de execução, ou seja, com construções simples, rápidas e económicas, que possam satisfazer as exigências do cliente quanto à sua qualidade, estética e custo. Nos dias de hoje, essa procura por soluções alternativas tem-se intensificado, pois cada vez é maior a necessidade de cumprir prazos muito limitados. Apesar desta ser uma das razões para o desenvolvimento de novas soluções, existem outras que assumem um papel igualmente importante para a construção. Uma delas é a qualidade da construção e sua certificação, pois a exigências por parte dos clientes são cada vez maiores. Outra é a garantia da segurança dos trabalhadores, condição fundamental para a empresa responsável. O presente trabalho aborda o tema referente aos pavimentos mistos em aço e betão e propõe-se explorar e desenvolver uma solução alternativa para o mercado da construção metálica e mista que seja capaz de dar resposta aos desafios enunciados.

Os pavimentos mistos em aço e betão são cada vez mais utilizados em edifícios, pois proporcionam um aumento significativo dos vãos livres, permitem a construção de estruturas mais leves e a colocação de um menor número de pilares do que numa solução tradicional. É de salientar ainda, outros dos benefícios associados a este tipo de pavimentos como, a rapidez e simplicidade de execução dos trabalhos, proporcionando uma plataforma de trabalho segura bem como uma proteção para os trabalhadores que se encontram no nível inferior devido à chapa perfilada existente na constituição dos mesmos e a existência de uma maior precisão no fabrico de vigas e chapas metálicas.

Num pavimento misto, associa-se normalmente um perfil metálico a uma laje mista com chapa colaborante e camada de betão. Estes dois elementos estruturais funcionam em conjunto devido à existência de conectores que garantem a ligação entre eles (ver Figura 1.1). Os conectores são elementos metálicos que são soldados ao perfil metálico e posteriormente ficam embebidos na laje, após betonagem e endurecimento do betão. A chapa perfilada possui a capacidade de ser utilizada como cofragem durante a fase de betonagem e como armadura de tração após o endurecimento do betão. A utilização da chapa perfilada possibilita a construção sem recurso a escoramento da laje, embora este possa ser necessário (para vãos maiores). O perfil metálico denomina-se viga e é geralmente um perfil em “I”.

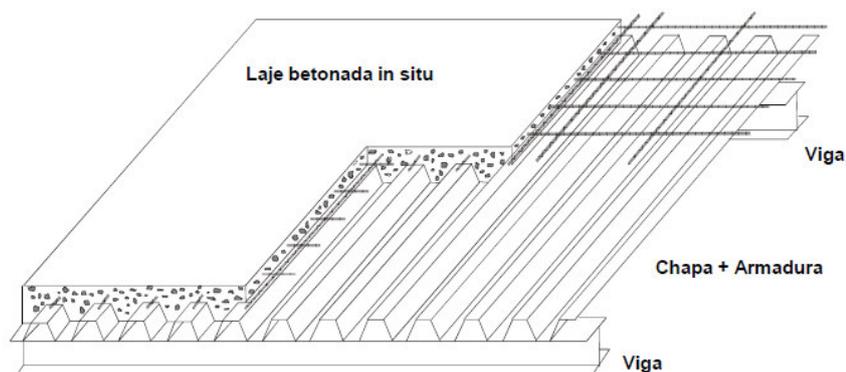


Figura 1.1 - Composição de uma laje mista

Com este trabalho, pretende-se realizar um estudo que abordará novas disposições destes elementos, considerando que a viga metálica é realizada com perfis metálicos enformados a frio e a laje é mista com chapa colaborante, aos quais se associa um conector metálico com elevada capacidade resistente e com capacidade para garantir o funcionamento misto pretendido. Este conector consiste numa chapa lisa recortada ou indentada (ver Figura 1.2), ou numa chapa nervurada do tipo Xadrez (ver Figura 1.3), que é posteriormente aparafusada à viga metálica e fica embebida na laje, após colocação e endurecimento do betão. A chapa lisa recortada ou indentada foi desenhada com base no trabalho desenvolvido por Veríssimo (2007), mas no presente caso de estudo esta chapa indentada do tipo *Crestbond* não será simétrica, pois pretende-se que os “dentes” da chapa sejam coincidentes com as nervuras da chapa perfilada a ser utilizada na laje e que os recortes/aberturas da chapa sejam coincidentes com as aberturas da chapa perfilada.

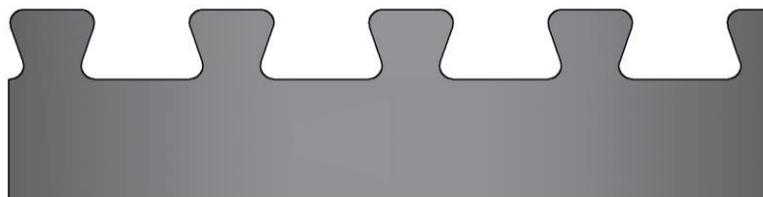


Figura 1.2 - Conector de chapa lisa indentada, concebido com base no conector *Crestbond*. (adaptado de Veríssimo, 2007)

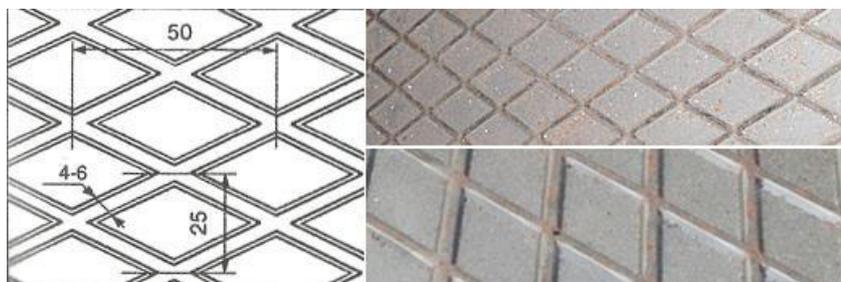


Figura 1.3 - Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez. (adaptado de J. Soares Correia, n.d.; António de Oliveira Borges, 2016; José Peixoto Rodrigues, 2016)

Numa primeira fase, pretende-se descrever as metodologias de dimensionamento e verificação de segurança tendo por base o desenvolvimento de uma Ferramenta de Cálculo, a qual permitirá realizar uma análise paramétrica dimensionando lajes e vigas mistas com as características específicas da solução proposta.

Na segunda fase será desenvolvida uma análise de sensibilidade que seja capaz de explorar a importância de diversos parâmetros relevantes para o comportamento do modelo, tendo por objetivo prever o comportamento da viga mista à flexão, comparando os dois géneros de conectores e duas tipologias de laje (laje nervurada e laje maciça).

A terceira fase tem como objetivo a elaboração de um modelo tridimensional dos modelos com os dois tipos de conectores, com a criação dos pormenores construtivos da solução desenvolvida, de forma a explorar a facilidade de construção e o melhor detalhe construtivo.

1.2 Objetivos

Com a realização deste trabalho, pretende-se desenvolver uma nova solução para pavimentos mistos em aço e betão.

De forma faseada, pretende-se alcançar os seguintes objetivos parciais:

- Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo para o pré-dimensionamento e análise paramétrica de vigas mistas com as características específicas da solução proposta;
- Desenvolvimento modelos numéricos capazes de reproduzir o comportamento do elemento estrutural proposto e a partir dos quais se possa desenvolver uma análise de sensibilidade que seja capaz de explorar a importância de diversos parâmetros relevantes, tendo por objetivo prever o comportamento da viga mista à flexão;
- Desenvolvimento de soluções para a execução, montagem e ligações entre os diversos componentes do sistema e demonstração das várias vantagens da utilização deste sistema, nomeadamente a rapidez de execução e sua leveza, entre outros, com recurso a modelação tridimensional.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por 6 Capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema desta dissertação, explicando as particularidade e as vantagens do sistema propostoe explicitando os objetivos a que o trabalho se propõe.

O Capítulo 2 denomina-se por Estado de Conhecimento e tem por objetivo fazer uma revisão bibliográfica aos diversos sistemas de pavimento mistos já existentes que utilizam perfis enformados a frio, explicando as respetivas vantagens e desvantagens e discutindo aspetos relevantes do seu comportamento estrutural.

O Capítulo 3 detalha a Ferramenta de Cálculo desenvolvida, explicando todo o procedimento para o seu desenvolvimento e funcionamento. A principal componente deste capítulo é o dimensionamento das vigas mistas, onde é descrito todo o procedimento de cálculo realizado, bem como as soluções adotadas para modelação numérica, após a realização de uma análise paramétrica.

O Capítulo 4 tem por objetivo a construção e análise dos modelos numéricos referentes às vigas mistas. Através das análises efetuadas aos modelos, pretende-se prever o seu comportamento à flexão comparando os dois tipos de conectores utilizados e os dois tipos de laje, de modo a espelhar o comportamento dos mesmos aquando da realização de ensaios.

No Capítulo 5 apresenta-se a modelação dos provetes no *software Tekla Structures*, bem como a obtenção de desenhos a partir do modelo 3D desenvolvido e também a obtenção dos mapas de quantidades para cada um dos quatro provetes.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação. Analisam-se e comparam-se as vigas mistas estudadas com os dois tipos de conectores e com a laje nervurada ou maciça. Neste Capítulo são ainda mencionados os trabalhos que podem vir a ser desenvolvidos no futuro com o objetivo de aprofundar os resultados e conclusões obtidos no decorrer da presente dissertação.

Estado de Conhecimento

2.1 Introdução

A construção mista em aço e betão surgiu com o desenvolvimento de diversos sistemas estruturais e construtivos, que visavam utilizar simultaneamente os dois materiais, aproveitando as vantagens de cada um. Inicialmente, o betão surgiu como material de revestimento visando a proteção do aço contra o fogo e a corrosão. Nos dias de hoje, o betão já é utilizado na construção metálica mista como um material que contribui para a resistência da estrutura e não apenas como um revestimento (Reis, 2012).

Vigas, pilares, coberturas, fachadas, lajes e elementos de fundação podem ser construídos como elementos mistos de aço e betão. Esta tendência tem vindo a acentuar-se no setor da construção devido às várias vantagens que estes sistemas apresentam e devido às exigências cada vez maiores no que diz respeito ao gasto de matérias-primas e à diminuição da poluição ambiente, ou seja, à limitação de emissão de gases tóxicos para a atmosfera.

Em comparação com as soluções tradicionais, a construção de sistemas mistos é bastante competitiva para estruturas de vãos médios a elevados, pois caracteriza-se pela rapidez de execução e pela redução considerável no peso total da estrutura.

Relativamente aos pavimentos mistos, estes são normalmente constituídos por uma chapa nervurada de aço à qual se junta uma camada de betão (laje), sendo este conjunto suportado por um perfil metálico (viga). No caso presente, a chapa nervurada e o perfil metálico vão ser constituídos por elementos enformados a frio, de modo a otimizar o processo construtivo.

A ligação destes dois elementos estruturais, laje mista e viga metálica, é efetuada através de um conector, que normalmente é soldado ao perfil metálico e que fica embebido na laje após o endurecimento do betão, garantindo assim um comportamento solidário entre estes dois componentes. No presente caso de estudo, o conector consiste numa chapa lisa recortada ou indentada, que é posteriormente soldada à viga metálica e fica embebida na laje, após colocação e endurecimento do betão.

Estes conectores devem permitir a transferência de forças de corte entre a laje mista e a viga metálica. Por se tratar de um sistema inovador, é importante compreender o seu comportamento mecânico, para que se possa garantir a capacidade resistente necessária e um comportamento dúctil do conector.

Os perfis enformados a frio são executados a partir de chapas de espessura reduzida, em geral com proteção anticorrosão previamente garantida por galvanização, permitindo obter secções com formas muito variadas. Estes perfis apresentam boas propriedades mecânicas e reduzidos gastos de material, permitindo assim uma eficiência estrutural que é expressa pela excelente relação entre resistência e peso (Martins, 2012). Os perfis permitem não só fabricar elementos de forma mais económica, mas também apresentam a possibilidade de dispor de uma grande variedade de formas e geometrias, suscitando o interesse a nível estrutural e também a nível arquitetónico.

2.2 O aço

O aço é um material artificial formado por minério de ferro e carbono, onde as suas propriedades podem variar de acordo com a percentagem de carbono existente na sua constituição. A sua elevada resistência proporciona a realização de peças bastante esbeltas, o que consequentemente fomenta a ocorrência de problemas de flexibilidade e instabilidade.

Os aços diferenciam-se entre si pela sua composição química. Esta pode ser alterada em função do interesse da sua aplicação final, através da adição de determinados elementos químicos, obtendo-se aços com diferentes graus de resistência mecânica, ductilidade, resistência à corrosão, resistência ao fogo, entre outros. (Ferraz, 2005)

Na Tabela 2.1 resumem-se os diversos tipos de formas de aço de construção existentes no mercado, de acordo com a sua aplicabilidade no setor da construção.

Tabela 2.1 - Tipo de formas do aço e sua utilização na construção. (adaptado de Valente, 2016)

Formas	Utilização
Perfis laminados	Construção metálica
Perfis enformados a frio	Construção metálica, na maioria dos casos como elementos secundários
Aço em barra	Construção em geral
Varões	Construção em betão armado
Fios e cordões de pré-esforço	Utilizado em betão pré-esforçado e outras estruturas
Chapa lisa	Construção em geral
Chapa de aço trapezoidal	Utilizada em revestimentos
Grelhas metálicas	Utilizada em pavimentos

De uma maneira geral, os aços detêm extraordinárias propriedades mecânicas, que se resumem de seguida:

- Resistem bem à tração e à compressão, desde que não haja a necessidade de ter em conta fenómenos de instabilidade;
- Resistem bem à flexão;
- São um material homogêneo, e, portanto, podem ser laminados, forjados, estampados, estriados e suas propriedades podem ainda ser modificadas por tratamentos térmicos ou químicos;
- Têm elevado peso volúmico;
- Possuem um módulo de elasticidade elevado;
- Possuem elevada ductilidade (capacidade de deformação plástica) (ver Figura 2.1);
- Grande facilidade construtiva.

Este material apresenta ainda alguns inconvenientes, como sejam:

- Fraca resistência ao fogo (necessidade de proteção);
- Está sujeito aos fenómenos de relaxação (diminuição da tensão para deformação constante), fadiga (diminuição da tensão de rotura para variações cíclicas do estado de tensão) e corrosão (ataque químico que origina a denominada ferrugem).

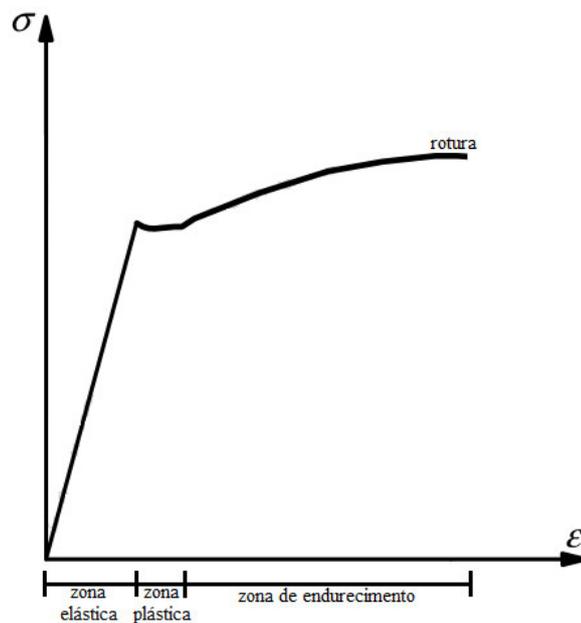


Figura 2.1 - Diagrama do comportamento do aço à tração. (adaptado de NP EN 1992-1-1: 2010, 2010)

2.3 Perfis enformados a frio

Os sistemas de aço leves também conhecidos por “*Light Steel Framing*” (LSF) têm sido ultimamente usados um pouco por todo o mundo, correspondendo ao resultado de uma busca por soluções mais racionais e eficientes para a construção do que as soluções tradicionais.

Os perfis enformados a frio são detentores de uma espessura constante e são produzidos através de um processo de dobragem de chapas planas de aço, à temperatura ambiente, formando perfis com resistência superior à da chapa plana original, ou seja, perfis que só adquirem a resistência necessária para serem utilizados como elementos estruturais após ser realizado o processo de moldagem a frio. O processo de galvanização é muito importante na medida em que confere ao aço uma durabilidade elevada, permitindo a sua proteção contra ataques de corrosão. (Gaspar, 2013)

Os produtos enformados a frio podem ser divididos em dois grupos, em função da tipologia e aplicação: perfis e chapas perfiladas. Os perfis enformados a frio podem ser abertos, fechados ou compostos e são utilizados como vigas, vigas secundárias e madres. As chapas perfiladas podem ter diferentes configurações, larguras, tamanhos e formas de encaixe ou ligação disponíveis e são utilizadas, no caso em estudo, como cofragens e elementos resistentes nas lajes mistas. Quando utilizadas em lajes, as chapas são capazes de resistir a cargas verticais e a esforços horizontais desde que devidamente fixas entre si e à estrutura portante. (Almeida & Faria, 2008; Moreira, 2012)

De seguida, são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens dos sistemas constituídos por elementos em aço enformado a frio. Como vantagens, podemos apresentar as seguintes (Gaspar, 2013; Gervásio, 2006; Gouveia, 2015):

- Elevada relação entre resistência e peso;
- Facilidade de manuseamento e transporte;
- Rapidez de execução, pois o processo de fabrico é simples, permitindo a produção em massa;
- Grande versatilidade de fabrico, pela possibilidade de produzir elementos com uma gama variada de geometrias e dimensões;
- Possibilidade de pré-fabricação, o que conduz a um controlo elevado em termos de qualidade do produto;
- Preservação do solo das fundações, pois a estrutura torna-se mais leve e, portanto, há uma redução das dimensões das fundações e menos movimentações de terras;
- Flexibilidade e adaptabilidade na conceção arquitetónica;
- Luminosidade e transparência, devido à elevada resistência do aço permitir construções mais leves e com grandes superfícies envidraçadas;

- Longevidade e durabilidade, quando efetuada uma proteção do aço contra a corrosão;
- Construção com espaços amplos;
- Facilidade na instalação de equipamentos e infraestruturas (redes de água, gás, eletricidade, ar condicionado, etc.);
- Facilidade de adaptação a outros materiais (vidro, alvenaria, madeira, etc.);
- Facilidade de adição de novos elementos construtivos, na reabilitação e/ou reconstrução de estruturas;
- Permite a construção de estruturas temporárias por se tratar de um sistema leve e fácil de manusear (parques de estacionamento, espaços para feiras, etc.);
- Sustentabilidade, pois é possível realizar a reciclagem do aço após utilização, sem que o mesmo perda as suas propriedades;
- Redução da quantidade de desperdícios no local da obra;
- Harmonia com os restantes materiais de construção.

As desvantagens dos sistemas que utilizam elementos enformados a frio são inferiores às vantagens que estes sistemas possuem e com alguma facilidade estas podem ser ultrapassadas. De seguida apresentam-se as seguintes desvantagens (Baptista, 2014; Gouveia, 2015):

- Comprimento dos perfis LSF limitado, devido às dimensões do transporte (entre 6 m a 12 m);
- Necessidade de tratamento superficial contra a corrosão;
- Necessidade de mão-de-obra e equipamentos especializados para a sua fabricação e montagem;
- Baixa resistência ao fogo;
- Comportamento estrutural que envolve problemas de encurvadura local, distorção e torção devido ao facto dos seus elementos terem pouca espessura, o que implica um cálculo mais complexo no dimensionamento dos elementos estruturais.

2.3.1 Tipos de perfis

Estão disponíveis no mercado vários tipos de secções enformadas a frio (ver Figura 2.2). As secções apresentadas são caracterizadas pelas dobras que formam troços curvos. Caso se pretenda melhorar o comportamento mecânico dos elementos enformados a frio, é possível adicionar dobras nas extremidades ou troços retos, que são considerados como nervuras de rigidez (*stiffeners*). (Moreira, 2012)

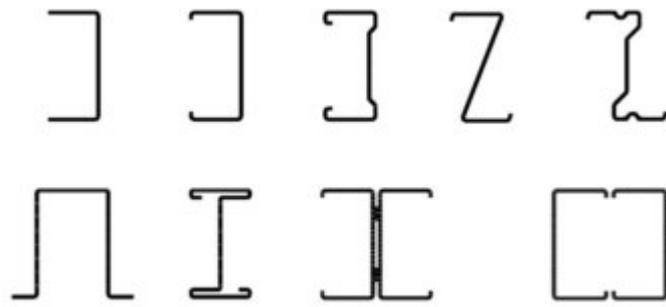


Figura 2.2 - Secções tipo de perfis enformados a frio. (Moreira, 2012)

2.3.2 Comportamento/desempenho estrutural

Na fase de seleção da secção transversal do perfil, é necessário ter em atenção o comportamento estrutural das diversas secções e a sua adaptabilidade ao meio estrutural pretendido, pois as vigas enformadas a frio são muito susceptíveis a fenómenos de encurvadura local e global.

Estudos recentes revelam que as vigas com secções abertas (C e I) têm tendência para instabilizar por encurvadura lateral-torsional (ver Figura 2.4 e Figura 2.5), enquanto as vigas com secções fechadas (R e 2R) tendencialmente instabilizam por encurvadura distorcional do perfil “U” (ver Figura 2.6 e Figura 2.7). Observou-se também, que nas vigas com secção em “C” a relação resistência/peso, varia menos do que nas vigas com secção “R”, em função da espessura, da altura ou do respetivo comprimento.

Na Figura 2.3 encontram-se representadas as secções transversais das vigas mencionadas neste caso de estudo.

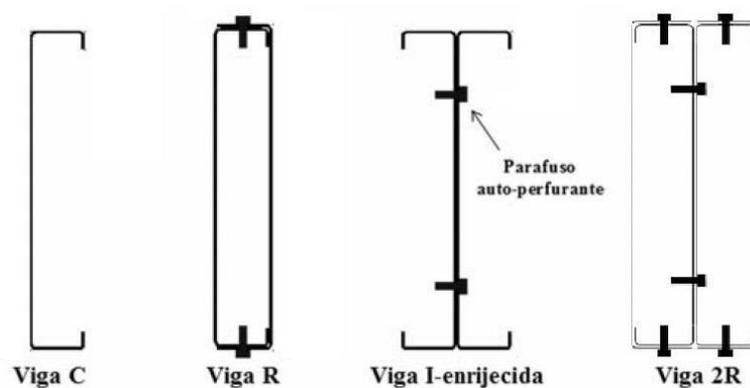


Figura 2.3 - Esquema das secções transversais. (adaptado de Laim & Rodrigues, 2011b)

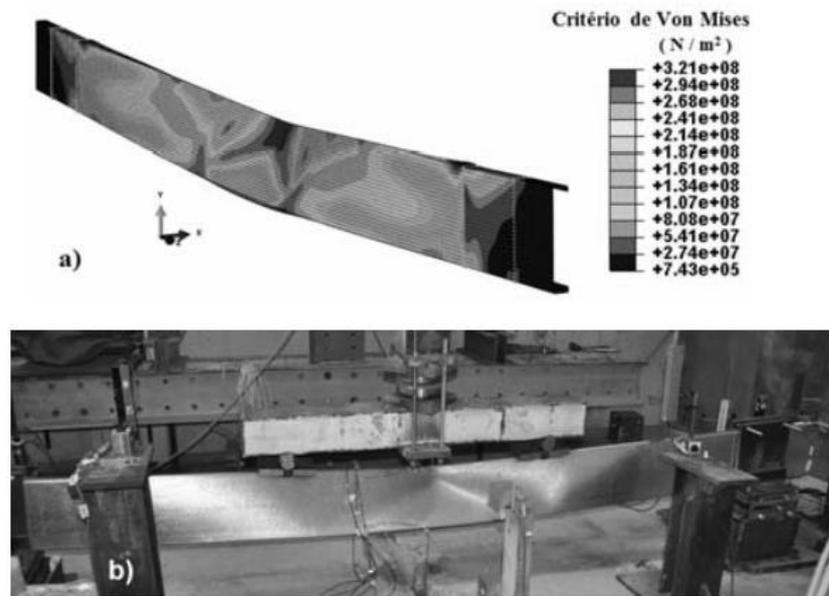


Figura 2.4 – Instabilidade lateral-torsional das vigas “C”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a)

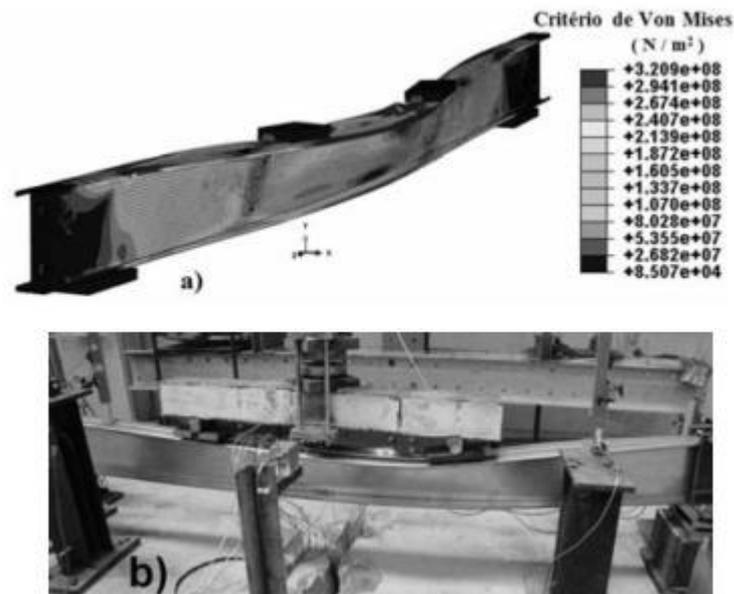


Figura 2.5 – Instabilidade lateral-distorcional das vigas I-enrijecidas: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a)

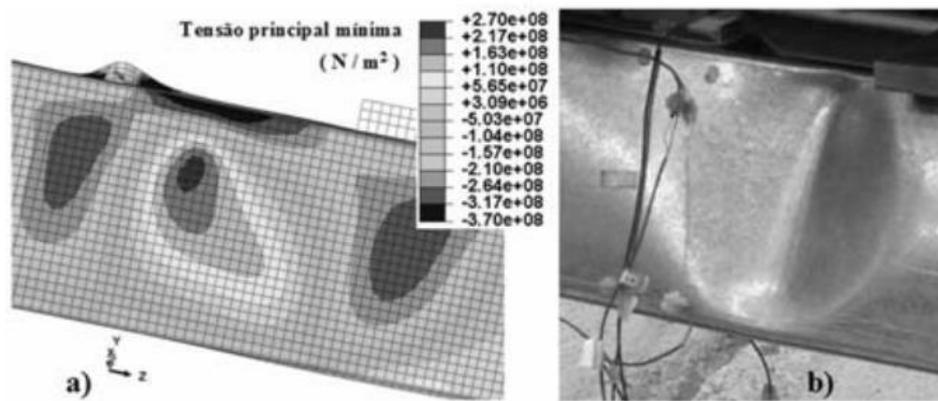


Figura 2.6 – Instabilidade local e distorcional das vigas “R”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a)

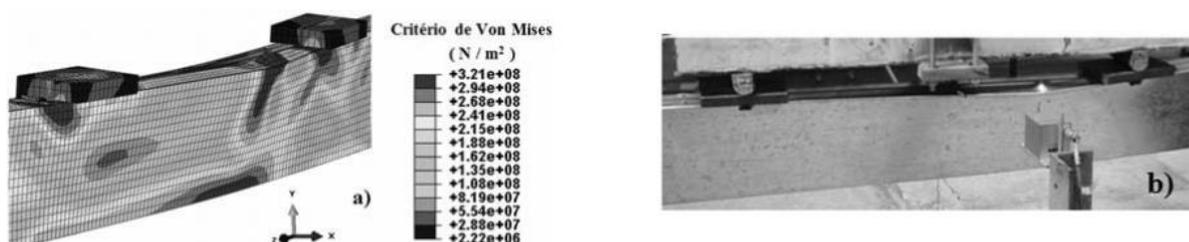


Figura 2.7 – Instabilidade distorcional do perfil “U” das vigas “2R”: (a) Obtidas na análise numérica; (b) Obtidas na análise experimental. (Laim & Rodrigues, 2011a)

Como seria de esperar, as vigas com secção “2R” conseguem reduzir os efeitos de instabilidade local e global. No entanto, estas acabam sempre por sofrer instabilidade lateral, devido aos fenómenos de distorção. Uma solução para contrariar esta instabilidade consiste na substituição dos perfis “U” simples por perfis “U” enrijecidos nas extremidades dos banzos, isto é, orientados para a parte de fora do perfil (ver Figura 2.8). As secções simétricas (I) oferecem uma maior resistência à flexão do que as secções assimétricas, como as secções “C”, e verifica-se ainda que as vigas fechadas possuem uma resistência à flexão superior às vigas abertas.

Utilizar vigas com um número elevado de perfis acaba por não ser a solução ideal, uma vez que a relação entre capacidade de carga da viga e o seu peso tende a estabilizar, ou seja, a diferença entre utilizar uma viga “2R” em vez de uma “R” não resulta em qualquer vantagem, pois o seu peso aumenta na mesma proporção da capacidade de carga, não havendo assim uma subida acentuada da capacidade de carga que nos leve a ponderar utilizar uma viga “2R” (Laim & Rodrigues, 2011a, 2011b).

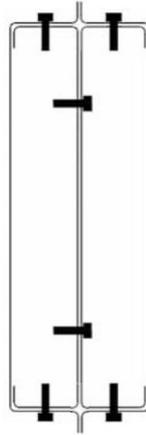


Figura 2.8 – Solução para as vigas com seção “2R”, com a utilização de perfis “U” enrijecidos nas extremidades dos banzo. (adaptado de Laim & Rodrigues, 2011a)

2.4 Vigas mistas em aço e betão

As vigas mistas associam na sua constituição um perfil metálico a uma laje de betão. Neste projeto, tal como já foi referido anteriormente, o perfil metálico vai ser um perfil enformado a frio.

Para entender o comportamento conjunto do perfil metálico e do betão, é fundamental conhecer o conceito de grau de interação, que pode ser total ou parcial. Como é possível verificar na Figura 2.9, diz-se interação total quando não existe movimento relativo entre os dois materiais, ou seja, o conector tem um comportamento infinitamente rígido e interação parcial caso contrário, ou seja, o conector tem um comportamento elasto-plástico.

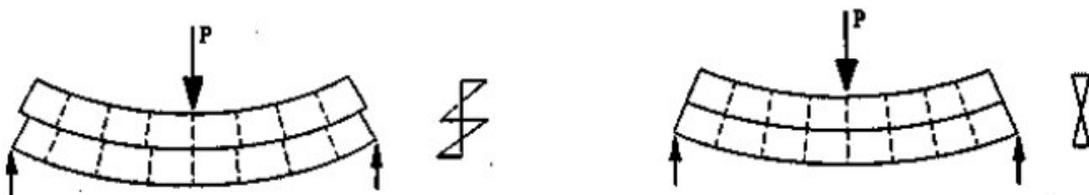


Figura 2.9 - Interação parcial e interação total.

Porém, o funcionamento conjunto destes dois materiais depende da eficácia da conexão, que é garantida pela existência de conectores. Os conectores podem ser de dois tipos, flexíveis ou dúcteis.

Um segundo conceito importante é o conceito de grau de conexão. Existem dois tipos de conexão, a conexão total e a parcial. A conexão total é a situação em que a resistência plástica à flexão da viga não é condicionada pela resistência da conexão, ou seja, o nº de conectores utilizado é suficiente para evitar que a rotura aconteça na interface aço-betão e a conexão parcial é quando a resistência última do elemento fica condicionada pela resistência da conexão, ou

seja, a rotura da viga ocorre na conexão antes que o momento plástico resistente da secção seja atingido. Neste caso, o valor de cálculo do momento resistente depende do nº de conectores utilizados (Valente, 2008).

O uso de perfis enformados a frio em vigas mistas oferece inúmeras vantagens. De seguida, enunciam-se as principais vantagens do uso deste género de perfis:

- Possibilidade de reduzir a espessura total da laje, através do uso de secções leves, sendo estas menos espaçadas entre si;
- Facilidade na variação da secção transversal - facilidade na obtenção de configurações irregulares;
- Liberdade no projeto de secções transversais, pois as secções enformadas a frio são obtidas a partir de chapas planas e podem ser projetadas e fabricadas por encomenda, sendo que também é relativamente fácil produzir elementos compostos constituídos a partir de secções e troços de chapas planas aparafusadas ou soldadas entre si;
- Flexibilidade na montagem de secções, pois as suas componentes são ligadas na oficina e/ou no local;
- Tecnologia de fabricação de secções enformadas a frio simples ficando disponível num curto espaço de tempo, o que não acontece com os perfis laminados a quente, particularmente para pequenos e médios projetos.

Existe pouca informação sobre os problemas diretos da aplicação destas vigas mistas com elementos enformados a frio como elementos estruturais. Todavia, sabe-se que um dos principais problemas é assegurar a transferência do esforço de corte entre a viga e a laje. Para que esta transferência seja assegurada, há que garantir uma boa conexão entre os dois elementos, mas também neste assunto existe pouca informação quanto ao desempenho e capacidade dos conectores que podem ser utilizados nestas aplicações específicas. (Hanaor, 2000)

2.5 Lajes mistas de aço e betão

As lajes mistas são compostas por chapas perfiladas, armaduras e betão. A chapa perfilada pode ser fixada diretamente às vigas secundárias, através de parafusos ou rebites. Esta chapa deve ser capaz de desempenhar o papel de cofragem durante a fase de betonagem e comportar-se como armadura de tração após o endurecimento do betão. A laje é betonada *in situ* e, após o endurecimento do betão, comporta-se como um elemento estrutural misto de aço e betão. (Almeida & Faria, 2008)

Para que a conexão entre o aço e o betão seja eficaz, é possível mobilizar a forma, introduzir reentrâncias na chapa e/ou colocar ancoragens na mesma ou junto aos apoios. Essas ancoragens são conseguidas através de conetores metálicos ou de deformações localizadas das nervuras (ver Figura 2.10).

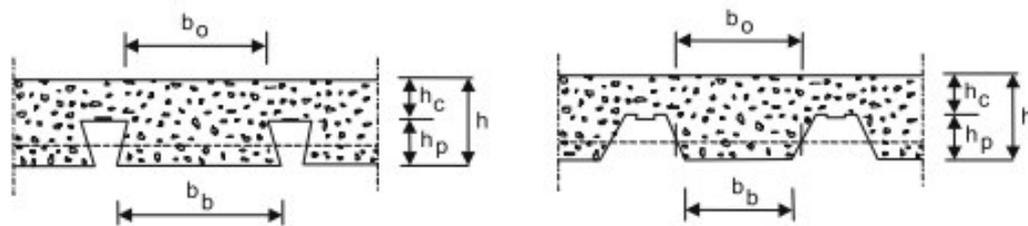


Figura 2.10 - Nervura reentrante e nervura aberta

As armaduras utilizadas na laje de betão são normalmente malhas quadradas de rede eletrossoldada, obtidas a partir de varões de pequeno diâmetro. Excepcionalmente, nos casos de grandes vãos é necessária a colocação de armadura superior (zonas de momentos negativos). Estas desempenham várias funções e por isso existem diversas razões que nos levam à sua instalação, tais como: conferir capacidade de distribuição de cargas pontuais ou lineares; reforçar a laje em zonas de grandes aberturas; conferir resistência ao fogo; controlo da fendilhação devida à retração (Almeida & Faria, 2008; Simões & Valente, 2014).

Existem inúmeras vantagens associadas à utilização de lajes mistas em aço e betão, das quais podemos destacar:

- Redução ou eliminação de escoramentos;
- Mais leves do que as lajes tradicionais de betão armado, diminuindo o peso próprio da estrutura;
- As chapas são transportadas facilmente pois são leves, sendo fixadas no local por dois ou três trabalhadores;
- Para um mesmo vão, a secção transversal da laje mista é menor do que a secção transversal da laje de betão armado;
- Maior rapidez e simplicidade no processo construtivo e, conseqüentemente, maior facilidade de execução;
- Plataforma de trabalhos segura, pois as chapas de aço depois de montadas, permitem a movimentação de pessoas e a colocação de materiais;
- A chapa perfilada protege os trabalhadores que se encontram num nível inferior;
- A qualidade das chapas e dos elementos de fixação são controlados em fábrica, onde as tolerâncias são bastante limitadas e onde existem procedimentos de qualidade pré-estabelecidos;
- Menores quantidades de materiais armazenados no estaleiro.

No entanto, existem algumas desvantagens associadas às lajes mistas, dos quais podemos salientar as seguintes:

- É necessário mão-de-obra especializada, devendo ainda existir planos de montagem para que os trabalhadores os possam seguir;
- É necessário um maior detalhe no que diz respeito aos aspetos construtivos;
- Baixa resistência do aço contra o fogo e corrosão.

Este último inconveniente é facilmente contornado, pois hoje em dia já existem medidas preventivas contra o fogo e um fabrico de aço especializado para a proteção contra a corrosão. (Metálica, 2016; Almeida & Faria, 2008; Simões & Valente, 2014)

2.5.1 Tipos de chapas

As chapas perfiladas são enformadas a frio e existem no mercado com as mais variadas formas (ver Figura 2.11). As principais características que definem as chapas perfiladas são a geometria e a capacidade resistente. Existem diversas tipologias de chapas com diferentes formas, profundidades, distâncias entre nervuras, larguras, recobrimentos laterais, nervuras de rigidez e elementos de conexão. (Simões & Valente, 2014)

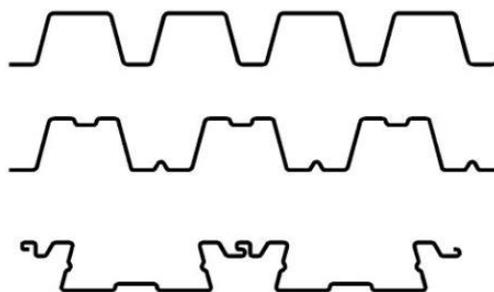


Figura 2.11 - Secções-tipo de chapas perfiladas. (Moreira, 2012)

2.6 Sistemas mistos

Os pavimentos mistos constituídos por perfis e chapas enformadas a frio são um sistema ainda relativamente inovador na Construção Civil em Portugal.

Estes pavimentos podem ter inúmeras formas quanto à chapa perfilada aplicada na laje, quanto aos perfis de aço e elementos de conexão. Consoante as propriedades e geometria dos materiais e com a geometria das ranhuras e relevos que são impostos na chapa metálica, as características de resistência e ductilidade destas soluções vão variar. É, portanto, necessário analisar e estudar quais as melhores soluções para que o sistema misto possa garantir a resistência suficiente em Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço. Neste sentido, foram concretizados já vários estudos, onde se obtiveram diversas soluções com desempenhos interessantes.

2.6.1 Sistema proposto por Hsu, Punurai, Punuri, & Majdi, (2014) e por Majdi, Hsu, & Zarei, (2014)

É um sistema misto que associa uma laje mista (chapa colaborante + camada de betão) com vigas metálicas realizadas com perfis C enformados a frio, dando origem a uma viga tipo I-enrijecida (ver Figura 2.3). Para garantir o funcionamento conjunto da viga I com a laje mista, são utilizados conectores enformados a frio com forma trapezoidal, que são fixos à viga metálica através de parafusos e ficam embebidos na laje após o endurecimento do betão. A solução proposta é apresentada na Figura 2.12.

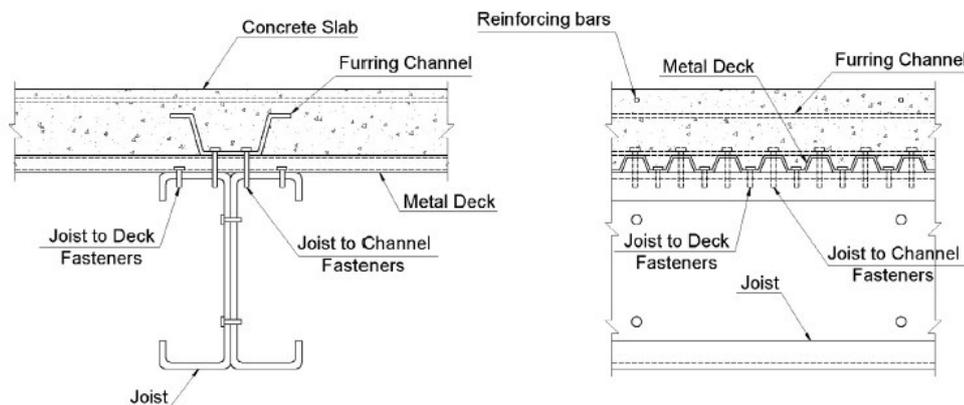


Figura 2.12 - Solução mista com conectores de formato trapezoidal (vista de corte e vista lateral).
(Majdi et al., 2014)

2.6.1.1 Comportamento/desempenho estrutural

Para conhecer o desempenho desta nova solução foram realizados ensaios experimentais que comparam este sistema com outro exatamente igual mas que não contém na sua constituição os conectores enformados a frio com forma trapezoidal (ver Figura 2.13). Realizaram-se também análises de elementos finitos, onde se compararam os resultados obtidos por via numérica com os resultados obtidos por via experimental.

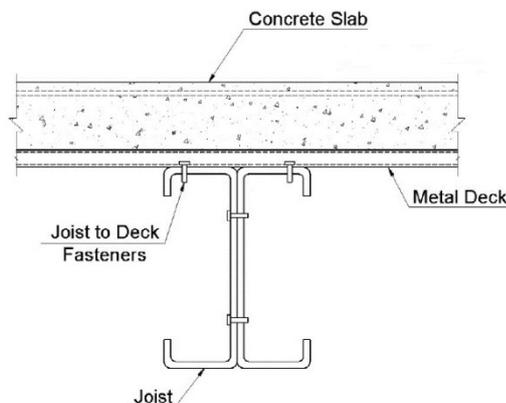


Figura 2.13 – Solução simples, sem conectores de formato trapezoidal (corte transversal). (adaptado de Majdi et al., 2014)

Podemos assim resumir, de acordo com os resultados da investigação, o comportamento deste sistema da seguinte forma:

- Possui um melhor comportamento em termos de resistência última e ductilidade, por comparação com a solução simples, como se pode verificar através da Figura 2.14;
- Apresenta um modo de rotura dúctil, o que valida a sua aplicabilidade na indústria da construção civil;
- Atinge a plastificação, ou seja, após a laje de betão começar a fissurar, esta consegue suportar mais carregamentos sem que ocorra instabilidade lateral na secção da viga, permitindo assim a plastificação da secção. Este desempenho está relacionado com o facto do conector trapezoidal possuir a capacidade de fazer subir o eixo neutro para a laje de betão, evitando assim a encurvadura no banzo superior da viga (ver Figura 2.15);
- Apresenta uma maior aderência, pois os fixadores ajudam a ajustar a posição da conexão, evitando ou reduzindo o escorregamento entre elementos estruturais.

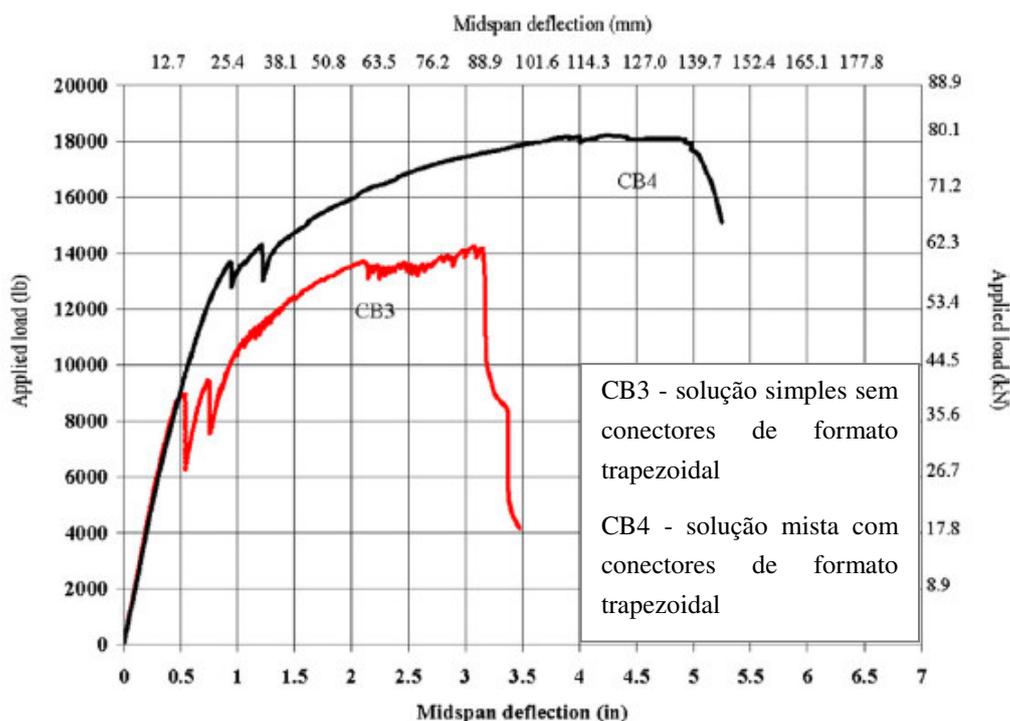


Figura 2.14 – Gráfico de carga versus deformação a meio vão, para os provetes CB3 e CB4. (Hsu et al., 2014)

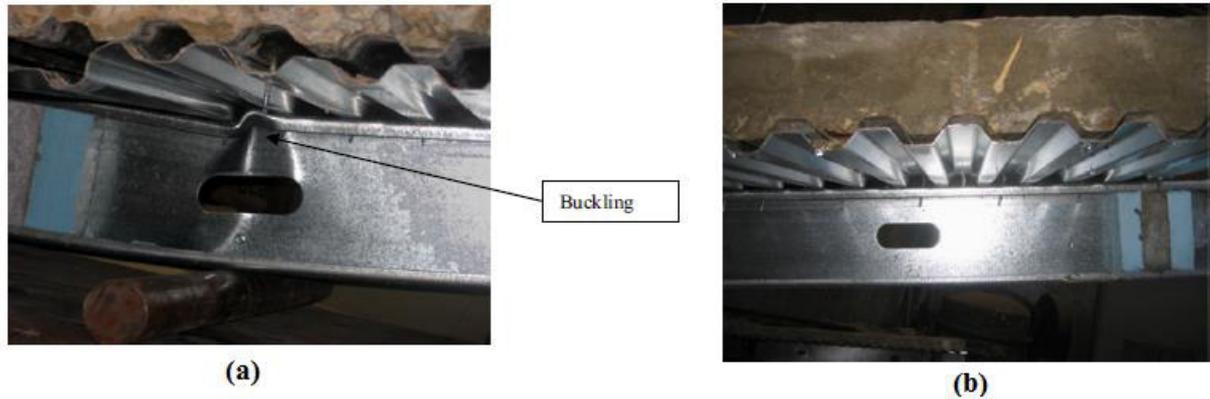


Figura 2.15 – Modos de rotura: (a) Sistema simples sem os conectores de formato trapezoidal, com rotura com encurvadura do banzo superior do perfil; (b) Sistema misto com os conectores de formato trapezoidal com rotura dúctil. (Hsu et al., 2014)

2.6.2 Sistema proposto por Hsu et al., (2014) e por Majdi et al., (2014)

Este sistema foi desenvolvido pelos mesmos autores, numa tentativa de obter melhores resultados aos ensaios de flexão, sendo a solução bastante semelhante à solução referida anteriormente. E tal como no caso anterior, é um sistema, em que após o endurecimento do betão os conectores ficam embebidos na laje e fixos à viga através de parafusos.

Esta solução apenas se diferencia da anterior pelo formato das abas dos conectores enformados a frio com secção trapezoidal. Nas abas são realizados cortes e posteriormente dobragens obtendo-se conectores com a configuração que está representada na Figura 2.16.

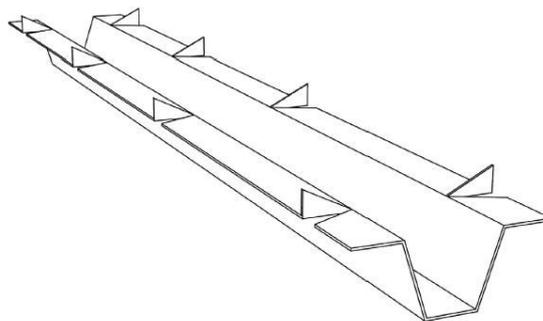


Figura 2.16 - Conector de secção trapezoidal com dobras. (Hsu et al., 2014)

2.6.2.1 Comportamento/desempenho estrutural

Este sistema foi comparado com o sistema anterior e os estudos concluíram que:

- Ambos os sistemas apresentam um comportamento semelhante em termos de rigidez estrutural;

- Ambos os sistemas atingem grandes ductilidades, no entanto com as modificações efetuadas nas abas dos conectores (corte e dobragem) consegue-se aumentar a ductilidade do sistema em 15%;
- A capacidade de carga do sistema aqui descrito possui um aumento inferior a 2% em relação à capacidade de carga do sistema anterior, o que demonstra que este novo sistema não conduz a um aumento da resistência;
- Ambos os conectores conseguem transferir de forma eficiente as forças de corte da laje para os perfis de aço enformados a frio.

Na Figura 2.17 está representado o gráfico força-deslocamento a meio vão, que confirma as conclusões sobre o comportamento do sistema referidas anteriormente.

Deste modo, constatou-se que ambos os sistemas, estão perfeitamente aptos para serem utilizados na indústria da construção civil.

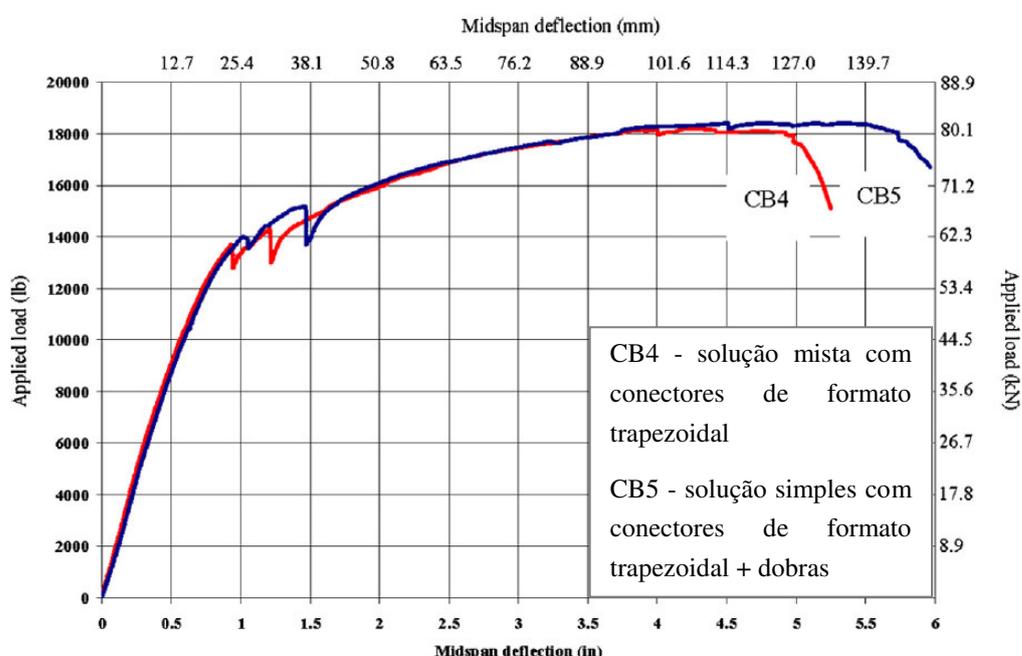


Figura 2.17 - Gráfico de carga versus deformação a meio vão, para os provetes CB4 e CB5. (Hsu et al., 2014)

2.6.3 Sistema proposto por Irwan, Hanizah, Azmi, & Koh, (2011) e por M.Irwan, Hanizah, & Azmi, (2009)

O sistema consiste numa laje maciça de betão e uma viga metálica composta por dois perfis com secção em “C”, formando uma viga I-enrijecida (ver Figura 2.18). Na viga serão efetuados cortes triangulares e dobragem dos mesmos nos banzos superiores, permitindo que estes elementos funcionem como um elemento de conexão que ficam embebidos na laje de betão. Este tipo de conexão denomina-se BTTST (*Bent-up Triangular Tab Shear Transfer*) (ver Figura 2.19).



Figura 2.18 – Sistema misto com BTTST: (a) Antes da betonagem da laje; (b) Após betonagem da laje. (Irwan et al., 2011)

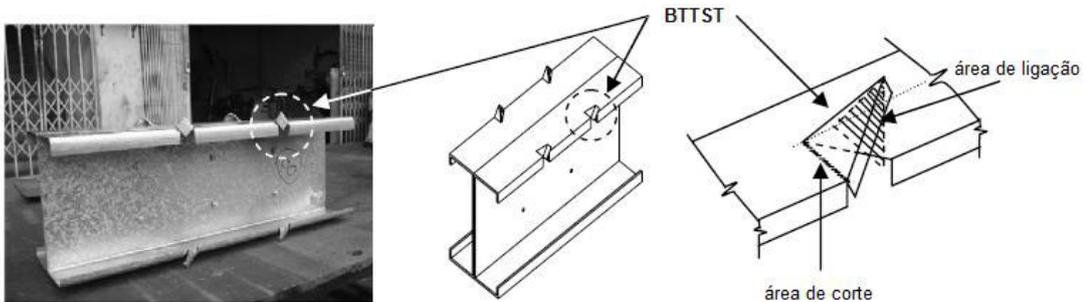


Figura 2.19 - Conexão BTTST. (adaptado de Irwan et al., 2011)

2.6.3.1 Comportamento/desempenho estrutural

Para estudar este sistema foram realizados ensaios experimentais à flexão, onde por cada provete ensaiado variaram-se diversos parâmetros como: a dimensão das dobras, o seu ângulo, o espaçamento entre dobras, a espessura do perfil e o tipo de betão. Para além de ensaiados estes provetes, realizou-se outro provete para ensaio que consiste na conexão LYLB (*Lakkavalli and Liu bent-up*) desenvolvida por Lakkavalli & Liu, (2006). O sistema LYLB é bastante idêntico ao sistema aqui referido, no entanto difere pelos cortes efetuados nos banzos superiores dos perfis que têm formato retangular em vez de triangular como se pode ver na Figura 2.20.

Outro dos provetes ensaiados consistia numa solução sem melhoramento da conexão entre a viga e a laje de betão, ou seja, era formado por uma laje de betão simples com uma viga I-enrijecida.

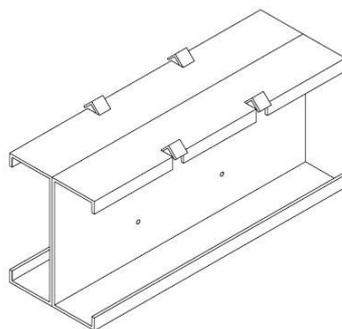


Figura 2.20 – Conexão LYL B. (M.Irwan et al., 2009)

Os resultados experimentais obtidos foram ainda comparados com a equação desenvolvida por M. Irwan et al., (2009). Esta equação foi desenvolvida a partir da realização de ensaios *push-out* do sistema com conexão BTTST, de modo a prever a capacidade de corte da conexão BTTST, ou seja, das dobras triangulares (ver Equação (2.1)).

Na Figura 2.21 estão representados alguns dos parâmetros utilizados nesta equação.

$$P_{tab} = 0,01 \cdot L_f \cdot L_s \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{f_{cu} \cdot E} + 0,5 \cdot L_f \cdot t \cdot f_y \quad (2.1)$$

em que:

- E módulo de elasticidade betão;
- L_f comprimento da lapela da dobra;
- L_s comprimento do vão da dobra;
- P_{tab} capacidade de corte da conexão BTTST;
- f_{cu} valor da tensão de rotura do betão à compressão;
- f_y valor nominal da tensão de cedência o aço estrutural;
- t Espessura do perfil de aço enformado a frio;
- θ ângulo da dobra.

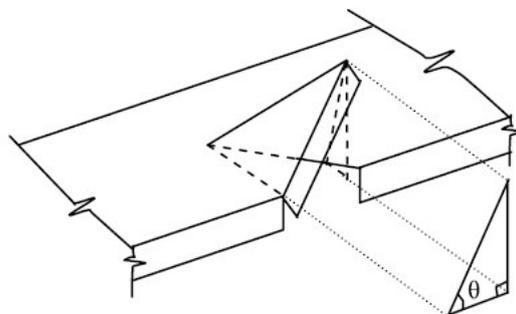
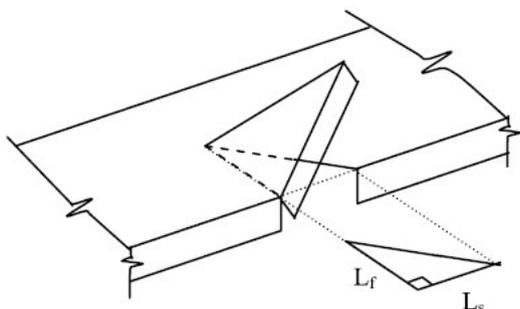


Figura 2.21 - Corte triangular e dobragem no banzo superior do perfil (BTTST). (Irwan et al., 2011)

Após estudado o sistema misto com conexão do tipo BTTST, provou-se que a nova solução possuía propriedades adequadas de resistência e rigidez sob cargas estáticas.

O sistema LYL B atingiu uma carga máxima superior ao do sistema simples sem melhoramento da conexão laje-viga em 9,6%. Contudo, o sistema BTTST mostrou um aumento de 18% da capacidade de carga máxima em relação à solução simples sem melhoramento da conexão laje-viga. Por comparação dos dois sistemas, LYL B e BTTST, concluiu-se que o sistema misto BTTST é melhor do que o sistema misto LYL B, pois possui uma maior capacidade resistente.

Assim, conclui-se que o sistema misto com conexão BTTST possuía um melhor desempenho, por comparação com os outros sistemas, em termos de resistência e flexão, ou seja, o sistema demonstra um aumento significativa da sua capacidade de resistência ao corte e, conseqüentemente uma diminuição da flexa do esforço de corte.

Verificou-se ainda que a capacidade resistente do sistema aumenta, com o aumento da espessura da viga mista, com o aumento das dimensões e do ângulo do sistema BTTST, e com o aumento da resistência do betão.

Os resultados teóricos são mais conservativos que os resultados experimentais, apresentando sempre um valor de momento inferior aos valores de momentos registados nos ensaios experimentais, no entanto, considera-se que ambos os valores obtidos estão em conformidade, visto que o erro entre os dois é mínimo.

2.6.4 Sistema proposto por Ruiz, (2009)

O sistema patenteado desenvolvido por Ruiz, (2009) é composto por um elemento estrutural com secção transversal em “C” e com cavidades equidistantes para a posterior colocação de uma calha contínua que apresenta nervuras triangulares (ver Figura 2.22).

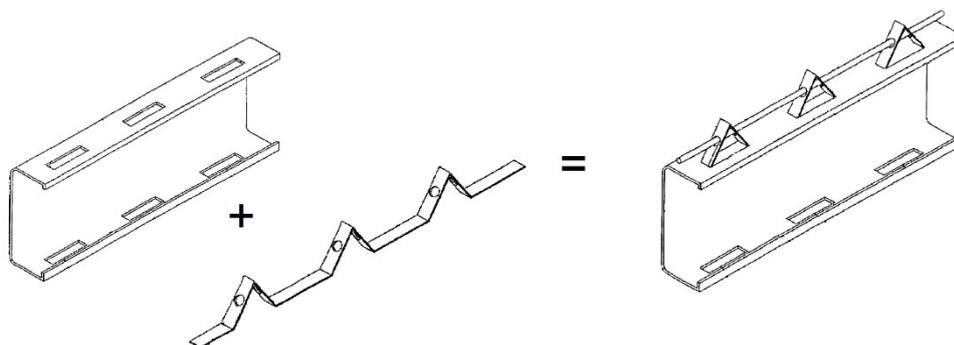


Figura 2.22 - Elemento estrutural com conexão por encaixe. (adaptado de RUIZ, 2009)

O sistema foi desenvolvido com o objetivo de fazer a conexão entre painéis de parede e painéis de laje. À luz das aplicações aqui estudadas, pode-se também pensar nesta solução como uma alternativa para realização da ligação entre a viga metálica e a laje mista. Assim, o perfil com secção transversal em “C” pode ser utilizado como viga. Após a colocação e endurecimento do betão na laje, que é constituída por uma chapa metálica ondulada, a calha com nervuras triangulares fica embebida na mesma, funcionando como elemento de conexão.

Esta patente americana, designada pelo número US 7,571,579 B2, não dispõe de mais informação sobre o seu comportamento estrutural, para além daquela que foi aqui apresentada.

CAPÍTULO 3

Ferramenta de Cálculo

Neste capítulo pretende-se descrever a construção de uma Ferramenta de Cálculo, suportada pelo *Software Microsoft Excel*, que foi desenvolvida com o objetivo de fazer a análise da capacidade resistente de uma secção mista em aço e betão que combina a utilização de perfis metálicos enformados a frio com uma laje mista trapezoidal.

O desenvolvimento desta Ferramenta de Cálculo resultou da necessidade de dispor de uma metodologia que permitisse fazer o pré-dimensionamento de vigas mistas com a geometria proposta neste trabalho. Em complemento, serviu também de base para uma comparação e validação dos resultados obtidos nos modelos numéricos desenvolvidos.

De modo a tornar a ferramenta mais eficiente, construiu-se uma base de dados que inclui as características geométricas e mecânicas de perfis metálicos em C enformados a frio, de acordo com os dados fornecidos nos catálogos de três empresas que produzem este tipo de perfis metálicos: “O FELIZ”, “Perfil Norte” e “Fabrica de Tubos da Barca” (FTB). Construiu-se também uma base de dados para as características mecânicas do betão e do aço enformado a frio e ainda uma base de dados das características geométricas e mecânicas para a chapa perfilada, de acordo com os catálogos das empresas “O FELIZ” e “Perfil Norte”.

Assim sendo, para facilitar a construção da base de dados foram empregues diferentes parâmetros na definição das propriedades mecânicas e geométricas de cada um dos elementos que compõe o sistema misto. Na Figura 3.1 é possível conhecer os parâmetros relativos às propriedades geométricas da solução mista proposta nesta dissertação.

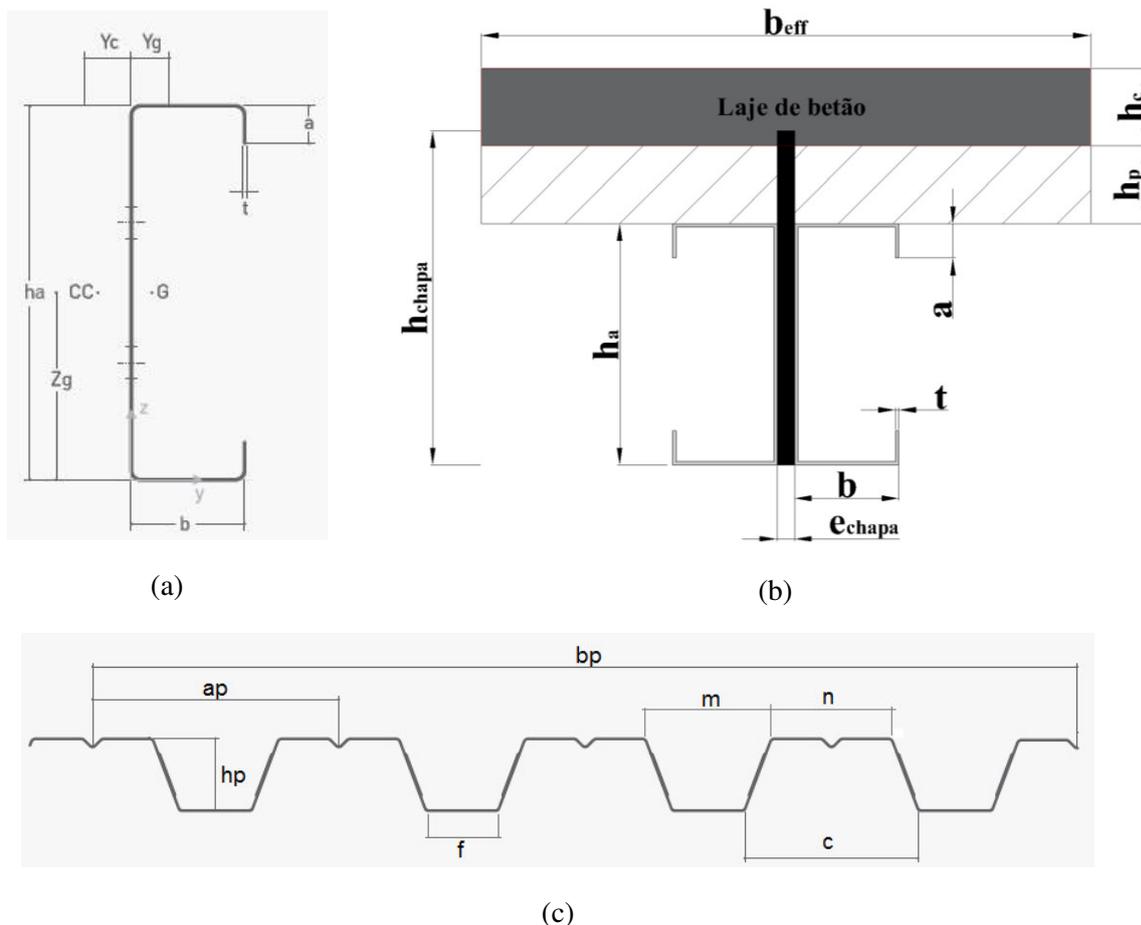


Figura 3.1 - a) Características geométricas para o perfil de secção em "C"; b) Características geométricas para a solução mista; c) Características geométricas para a chapa perfilada.

O dimensionamento dos perfis enformados a frio realizou-se de acordo com a NP EN 1994-1-1: 2011. Foram também consultados exemplos recolhidos dos documentos Simões & Valente, (2009) e Valente, (2008).

3.1 Estrutura da ferramenta

A área de trabalho está dividida em várias folhas de modo a facilitar o manuseamento e interação da ferramenta. Assim decidiu-se incluir as seguintes folhas na ferramenta:

- Parâmetros;
- Perfis "C" enformados a frio;
- Chapas perfiladas enformadas a frio;
- Dados das vigas mistas enformadas a frio;
- Cálculo das características plásticas;
- Cálculo das características elásticas;
- Cálculo da deformação;
- Cálculo do tipo de conexão (esforço rasante).

De seguida apresenta-se uma breve explicação sobre o conteúdo de cada folha, permitindo perceber a sua importância na Ferramenta de Cálculo.

3.2 Parâmetros

Esta folha inclui informação relativa às classes e propriedades do betão e do aço enformado a frio, inclui também informações sobre o diâmetro e espaçamento da armadura a colocar na laje, sobre os coeficientes de regressão para o cálculo da resistência ao corte do conector *Cerstbond* e sobre as variáveis para o cálculo da resistência do conector Xadrez.

Para cada classe de betão é fornecida informação relativa ao valor característico da tensão de rotura aos 28 dias de idade em cilindro (f_{ck}) e em cubos ($f_{ck.cube}$), ao valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (f_{cm}), ao valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples (f_{ctm}), ao módulo de elasticidade secante do betão (E_{cm}), à extensão do betão à compressão correspondente à tensão máxima (ε_{cl}) e à extensão última do betão à compressão (ε_{cu}). Todos os valores são retirados do Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1, 2010).

O aço enformado a frio está dividido também por classes e para cada classe apresenta-se o valor nominal da tensão de cedência (f_y) e o valor nominal da tensão de rotura à tração (f_u). Todos os valores considerados foram obtidos na parte 1-3 do Eurocódigo 3 (EN 1993, 2006).

Na armadura a colocar na laje de betão é fornecida informação sobre o diâmetro (ϕ) e sobre o espaçamento entre varões. Estes parâmetros servem para a armadura transversal como também para o caso de armadura longitudinal.

Os coeficientes de regressão utilizados no cálculo da resistência ao corte do conector de chapa lisa do tipo Indentado e as variáveis para o cálculo da tensão tangencial máxima, que dará origem ao cálculo da resistência ao corte do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, serão apresentados e explicados posteriormente no item 3.12.2 e 3.12.3, respetivamente.

No Anexo I, encontra-se a Tabela AI.1 que reúne as informações relativas ao betão, a Tabela AI.2 que contém as informações referentes ao aço enformado a frio e as Tabelas AI.3 e AI.4 que possuem as informações sobre a armadura.

3.3 Perfis “C” enformados a frio

Na folha perfis “C” enformados a frio são apresentadas as propriedades geométricas e mecânicas dos vários perfis comercializados pelas empresas O Feliz, Perfil Norte e FTB, bem como o material em que são fabricados, já que este difere de empresa para empresa. As

propriedades geométricas foram retiradas de cada um dos catálogos e dispostas de acordo com o representado na Figura 3.1(a).

Os perfis dispõem de uma referência para ser mais fácil e viável a sua identificação, por exemplo no perfil C 140 × 60 × 1,5, a letra “C” significa que é um perfil com secção em C, o valor a seguir à letra “C” representa a sua altura (h_a), o segundo valor é a medida de base do perfil (b) e por último temos a espessura do perfil (t). (Departamento Técnico da Fábrica de Tubos da Barca, n.d.; O FELIZ, 2014; PERFILNORTE, 2011)

No Anexo I, encontra-se a Tabela AI.7 com as informações dos perfis.

3.4 Chapas perfiladas enformadas a frio

Na presente folha foram inseridas as propriedades das chapas perfiladas e o respetivo tipo de material de fabrico, de acordo com a informação fornecida pelas empresas O Feliz e Perfil Norte. Em termos de propriedades foram introduzidas as propriedades do aço, as propriedades mecânicas da secção bruta e da secção efetiva em flexão positiva e negativa da chapa perfilada (ver Figura 3.1(c)). Também estão presentes os parâmetros de corte longitudinal, os valores da resistência ao esmagamento da alma e da resistência ao corte transversal. (O FELIZ, 2014, 2016; PERFILNORTE, 2011)

Como no caso dos perfis, as chapas também dispõem de uma referência, por exemplo 1PC 60 × 820 × 0,7, onde as iniciais PC significam perfil colaborante, seguida da altura da chapa (h_p), da medida b_p , o por último da espessura da chapa (t).

Ainda na mesma folha existe a opção para a disposição da chapa, ou seja, se esta é paralela à viga ou com nervuras transversais à mesma (ver Figura 3.2).

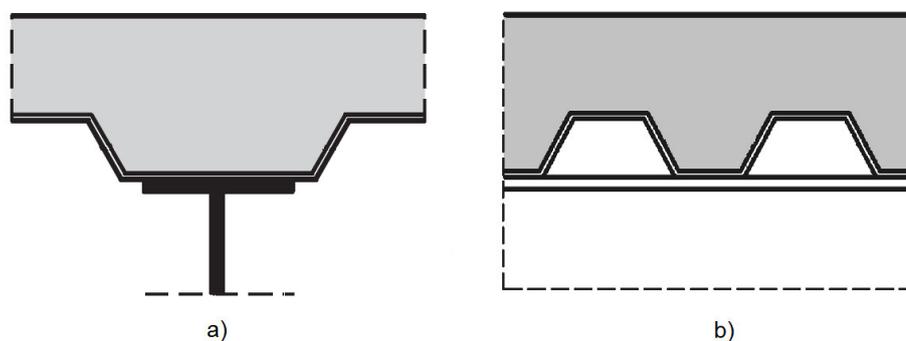


Figura 3.2 - Chapa perfilada. a) Chapa paralela a viga; b) Chapa transversal à viga. (adaptado de NP EN 1994-1-1, 2011)

No Anexo I, encontram-se as Tabelas AI.8 e AI.9 com as informações aqui referidas.

3.5 Dados das vigas mistas

Neste folha, é selecionada toda a informação fundamental ao dimensionamento das vigas mistas, tendo por base os parâmetros definidos nas folhas anteriores.

A tabela “Dados Gerais”, tem por base informação recolhida nas folhas anteriores. Estes dados estão divididos de acordo com o perfil “C”, com a chapa perfilada selecionada e com o betão utilizado (ver Figura 3.3). Nesta tabela constam ainda informações adicionais como a altura total da laje, a altura total da viga mista, a altura da viga metálica enformada a frio com secção “C” mais a altura da chapa perfilada, a relação vão altura e ainda o coeficiente de homogeneização, n , a utilizar nos cálculos das folhas posteriores. Este coeficiente é calculado através das Equações (3.1) e (3.2).

$$n = \frac{E_a}{E_{cm}} \quad (3.1)$$

onde:

$$E_c = E_{cm} \quad \text{para efeitos de curta duração.} \quad (3.2)$$

em que:

E_a módulo de elasticidade do aço estrutural;

E_c módulo de elasticidade tangente na origem, $\sigma_c = 0$, para o betão;

E_{cm} módulo de elasticidade secante do betão;

n coeficiente de homogeneização.

Dados Gerais			
Chapa perfilada de aço		Unidades	
Chapa Aço	1PC 60 x 820 x 1,0		
Catalogo	O FELIZ		
Material	S320 GD + Z		
Disposição	Chapa transversal à viga		
Classe de aço	S320GD+Z		
fy	320	MPa	
hp	60	mm	
bp	820	mm	
ap	205	mm	
c	145	mm	
f	60	mm	
n	100	mm	
m	105	mm	
t	1	mm	
Armadura (malha sol)		Unidades	
φ transversal	φ8		
		8	mm
esp. transversal	100	mm	
		100	mm
nbarras,transv.		23	
φ longitudinal	φ6,5		
		6,5	mm
esp. longitudinal	150	mm	
		150	mm
nbarras,longit.		16	
Conexão - Xadrez		Unidades	
<i>Variáveis automáticas</i>			
Autor	Thomann M., Lebet J. P.		
Disposição	R2		
μ		0,72	
A'		0,13	
σ0		0,7	MPa
m		0,051	0,3 < m < 0,6
k		0,73	0,73 < k < 0,75
<i>Variáveis manuais</i>			
μ		0,7	
A'		0,13	
σ		0,5	MPa
σ0		0,7	MPa
m		0,05	
k		0,7	
<i>Tensão tangencial máxima - manual</i>			
τmáx		3	MPa
Perfil de aço		Unidades	
Perfil Aço	C 140 x 60 x 2,0		
Catalogo	O FELIZ		
Material	-		
Classe de aço	S280GD+Z		
fy	280	MPa	
ha	140	mm	
b	60	mm	
a	20	mm	
t	2	mm	
Área	584	mm ²	
Iy	1813987	mm ⁴	
Ea	210	GPa	
Ya	1		
Betão		Unidades	
Classe de betão	C25/30		
beff	350	mm	
hc	60	mm	
Ac	21000	mm ²	
fck	25	MPa	
Ec = Ecm	31,5	GPa	
Yc	1		
Chapa Conector		Unidades	
hchapa	140	mm	
echapa	5	mm	
Achapa	700	mm ²	
fyohapa	220	MPa	
Yehapa	1		
Alturas consideradas		Unidades	
htotal,laje (hp + hc)		120	mm
htotal (ha + hp + hc)		260	mm
ha + hp		200	mm
Relação vão/altura			
vão/htotal		9,01	
Coefficiente de homogenização			
n		6,666666667	
Conexão - Indentado		Unidades	
<i>Coefficiente de regressão automático</i>			
Autor	Vieira W. B.		
B1		3,56	
B2		0,536	
B3		1,62	
B4		28,76	
<i>Coefficiente de regressão manual</i>			
B1		2	
B2		2	
B3		0,2	
B4		1	
naberturas		6	
h ranhura		80	mm
D		80	mm
Acc		77001,29	mm ²
Asf		578,05	mm ²
Aaberturas		8720,00	mm ²
p		0,008	mm ²

Figura 3.3 - Introdução de dados gerais na Ferramenta de Cálculo.

Como se pode constatar na Figura 3.3, os dados que são necessários escolher na tabela de “Dados Gerais” são: o tipo de perfil com secção “C”, a classe de aço do mesmo perfil, o módulo de elasticidade, o coeficiente de segurança do aço do perfil, o tipo de chapa perfilada de aço e a sua posição em relação ao perfil, a classe de aço da chapa perfilada, a altura do conector e sua espessura, a classe de aço do conector e o respetivo coeficiente de segurança, a classe de betão, a largura efetiva da laje de betão e a sua altura, o coeficiente de segurança do betão, o diâmetro e o espaçamento da armadura transversal e longitudinal, o autor dos coeficientes de regressão ou inserir o valor manual destes coeficientes, o número de aberturas e a altura das ranhuras do conector Indentado e o autor e a disposição das variáveis automáticas para o conector Xadrez, ou então inserir o valor manual para estas variáveis ou ainda colocar diretamente o valor da tensão tangencial máxima, não sendo necessário nesse caso o valor das variáveis automáticas.

Na tabela dos “Dados Introdutórios” os dados a introduzir são o comprimento do vão, a carga P a que a viga mista vai estar sujeita (ver Figura 3.4). Como se pode verificar na Figura 3.6 o comprimento do vão, L , encontra-se dividido em três medidas (b-a-b).

Dados introdutórios		
P	143	kN
L	2172,1	mm
a	786,05	mm
b	600	mm

Figura 3.4 - Introdução dos dados do vão e do carregamento.

Apenas as células que se encontram a cor laranja devem ser preenchidas todas as outras são de preenchimento automático.

Nesta folha de introdução de dados é possível visualizar ainda os esforços atuantes, como o esforço transversal atuante e o momento fletor atuante (ver Figura 3.5). O ensaio à viga mista enformada a frio a ser realizado tem a configuração da Figura 3.6, e portanto, com base na disposição da carga P e no comprimento do vão procedeu-se ao calculo destes esforços.

Esforços atuantes		
MEd	56,20	kN.m
VEd	71,50	kN

Figura 3.5 - Esforços atuantes calculados na Ferramenta de Cálculo.

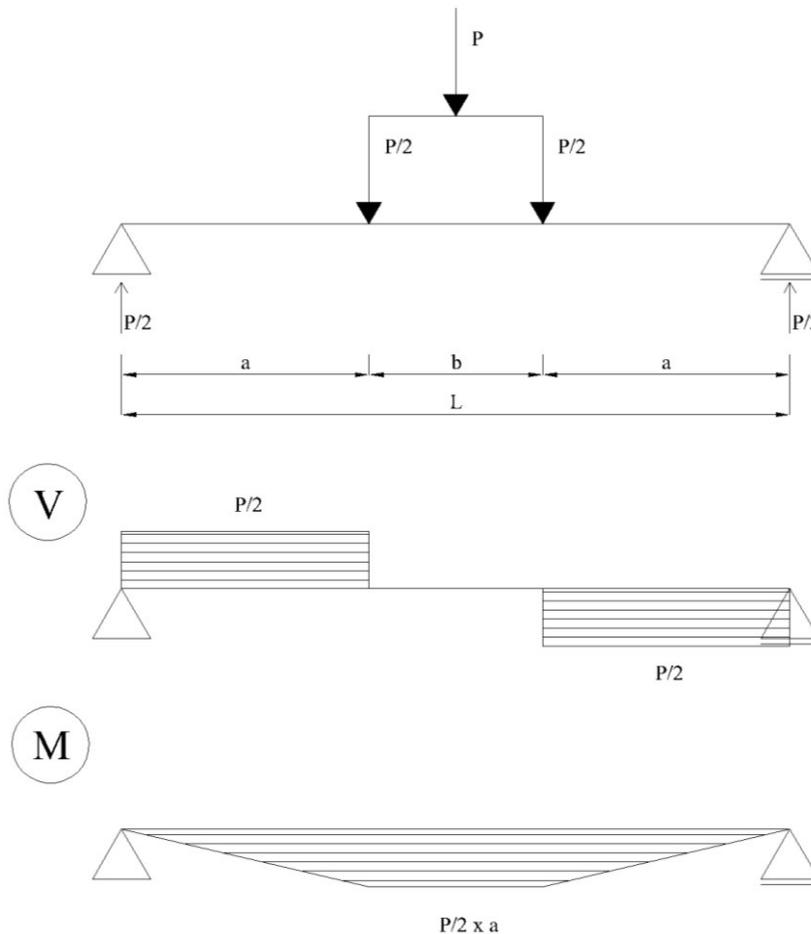


Figura 3.6 – Esquema do ensaio e esforços atuantes.

Assim os esforços atuantes são dados pelas Equações (3.3), (3.4) e (3.5).

$$V_{Ed} = \frac{P}{2} \quad (3.3)$$

$$M_{Ed} = \frac{P}{2} \times a \quad (3.4)$$

onde:

$$b = (L - a) / 2 \quad (3.5)$$

em que:

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

P carregamento a que a secção está submetida;

V_{Ed} valor de cálculo do esforço de corte atuante na secção mista;

L comprimento total do vão;

a distância pré-definida entre as duas cargas $P / 2$;

3.6 Cálculo das características plásticas da secção transversal

Esta secção da ferramenta é referente ao dimensionamento das características plásticas da viga mista selecionada, considerando apenas a situação de flexão positiva. Será calculado automaticamente o momento plástico resistente e a posição do eixo neutro.

Para que o cálculo seja efetuado corretamente deve-se clicar no botão “CALCULAR”, sempre que se altera os dados na folha referente aos mesmos, para que os dados nesta folha sejam atualizados. Apenas nesta folha é que se procede deste modo, já que em todas as outras os cálculos são atualizados automaticamente, sem necessidade de criação de macros, como foi o caso particular da folha das características plásticas.

Inicialmente optou-se por se dividir os cálculos em três casos distintos:

- Caso A: $h_{chapa} > h_a + h_p$;
- Caso B: $h_{chapa} > h_a$ e $h_{chapa} \leq h_a + h_p$;
- Caso C: $h_{chapa} \leq h_a$.

Em cada caso, existem várias hipóteses de cálculo que são definidas de acordo com a profundidade do eixo neutro, e.n.. Estas hipóteses estão resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Hipóteses de cálculo para as características plásticas da secção transversal mista.

Caso A	Caso B	Caso C
Caso A.1	Caso B.1	Caso C.1
e.n. na laje de betão acima do conector	e.n. na laje de betão	e.n. na laje de betão
Caso A.2	Caso B.2	Caso C.2
e.n. na laje de betão atravessando o conector		
Caso A.3	Caso B.3	Caso C.3
e.n. na chapa perfilada da laje	e.n. na chapa perfilada da laje	
Caso A.4	Caso B.4	Caso C.4
e.n. no banzo superior do perfil	e.n. no banzo superior do perfil	e.n. no banzo superior do perfil
Caso A.5	Caso B.5	Caso C.5
e.n. nas abas superiores do perfil	e.n. nas abas superiores do perfil	e.n. nas abas superiores do perfil
Caso A.6	Caso B.6	Caso C.6
e.n. no perfil	e.n. no perfil	e.n. no perfil

Antes de se programar as equações para o cálculo do momento plástico resistente, $M_{pl,rd}$, e para a profundidade do eixo neutro, z , programou-se os cálculos de todas as forças máximas aplicadas em cada componente da secção transversal, com o objetivo de tornar o cálculo mais fácil e eficiente (ver Figura 3.7).

Forças totais plásticas			
$N_{cf,tot}$	446,25	kN	força compressão no betão, sem betão no local do conector
N_{cf}'	0	kN	força compressão no betão no local do conector
$N_{cf,1}$	446,25	kN	força compressão no betão, acima do conector (só interessa no Caso A)
$N_{perfil,tot}$	327,04	kN	força tração no perfil
$N_{perfil,banzos\ sup}$	67,20	kN	força compressão no perfil, nos banzos
$N_{perfil,abas\ sup}$	40,32	kN	força compressão no perfil, nas abas
$N_{chapa,tot}$	154,00	kN	força tração na chapa
$N_{chapa,1}$	154,00	kN	força tração na chapa, na altura total do perfil
$N_{chapa,1A}$	132,00	kN	força tração na chapa, na altura abaixo da aba do perfil
$N_{chapa,1B}$	19,80	kN	força tração/compressão na chapa, na altura da aba do perfil
$N_{chapa,1C}$	2,20	kN	força compressão na chapa, na altura da espessura do banzo
$N_{chapa,2}$	0,00	kN	força compressão na chapa, na altura da chapa nervurada
$N_{chapa,3}$	0,00	kN	força compressão na chapa, dentro da esp. maciça da laje

Figura 3.7 - Forças plásticas aplicadas ao longo de toda a secção transversal da viga mista seleccionada.

3.6.1 Forças aplicadas na laje de betão

A força de compressão total do betão, $N_{cf,tot}$, foi calculada tendo em atenção que se o conector se prolongar até à zona maciça da laje, há que retirar uma força de compressão do betão correspondente ao espaço que o conector ocupa na parcela maciça de betão, N_{cf}' (ver Figura 3.8). Se o conector não intercetar a laje maciça de betão então N_{cf}' é igual a zero (ver Figura 3.9).

A força $N_{cf,tot}$ só é válida se o eixo neutro se situar abaixo da laje maciça de betão.

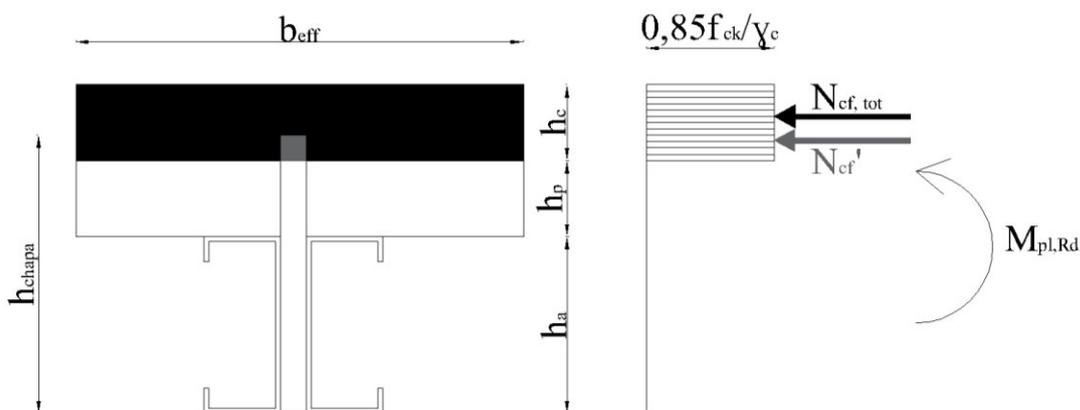


Figura 3.8 - Força de compressão total no betão e força de compressão no betão correspondente ao espaço que o conector ocupa na parcela maciça de betão.

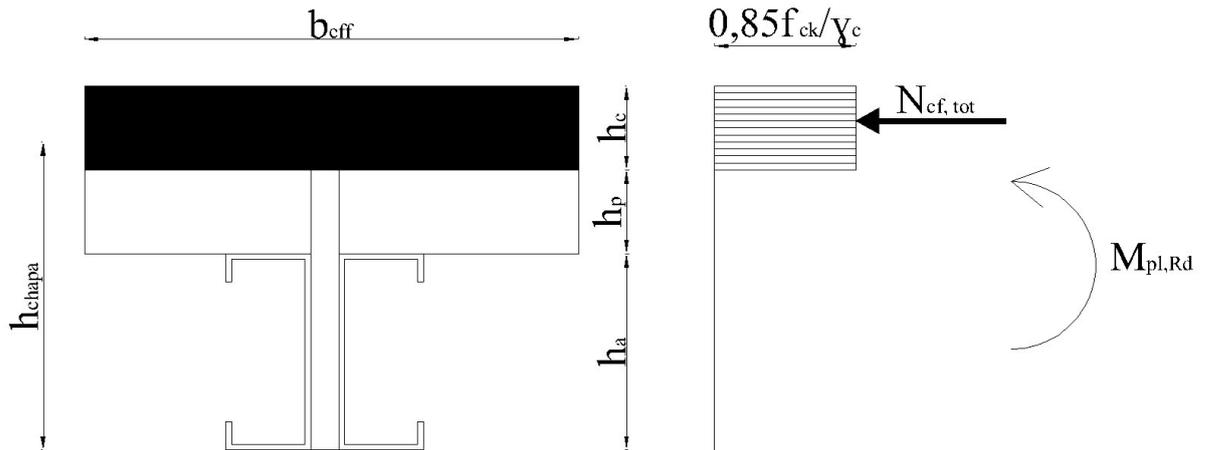


Figura 3.9 - Força de compressão total do betão sem o conector intercalar a laje maciça de betão.

A força de compressão total do betão, $N_{cf,tot}$, é descrita pela Equação (3.6) e a força de compressão do betão correspondente ao espaço que o conector ocupa na parcela maciça de betão, N_{cf}' é descrita pelas Equações (3.7) e (3.8).

$$N_{cf,tot} = h_c \times b_{eff} \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} - N_{cf}' \quad (3.6)$$

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a + h_p, \text{ então } N_{cf}' = e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + h_c) \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.7)$$

$$\text{Se } h_{chapa} \leq h_a + h_p, \text{ então } N_{cf}' = 0 \quad (3.8)$$

$$h_{total} = h_c + h_p + h_a$$

em que:

$N_{cf,tot}$ valor de cálculo do esforço normal de compressão no banzo de betão com conexão total;

N_{cf}' valor de cálculo do esforço normal de compressão no banzo de betão correspondente à parcela ocupada pelo conector com conexão total;

b_{eff} largura efetiva total de betão;

e_{chapa} espessura total da chapa do conector de aço estrutural;

f_{ck} valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade;

h_a altura da secção “C” de aço estrutural;

h_c espessura do betão acima da superfície plana principal do topo das nervuras das chapas;

h_{chapa} altura total da chapa do conector de aço estrutural;

h_p altura total das chapas perfiladas de aço excluindo bossas;

h_{total} altura total da viga mista

γ_c coeficiente parcial para o betão.

A força de compressão do betão acima do conector, $N_{cf,1}$, quando o e.n. atravessa a espessura maciça da laje de betão, deixando parte da laje comprimida e outra parte tracionada (ver Figura 3.10), é descrita pela Equação (3.9). Se o conector não intercepar a laje maciça de betão, então $N_{cf,1}$ é igual a $N_{cf,tot}$, com N_{cf}' igual a zero.

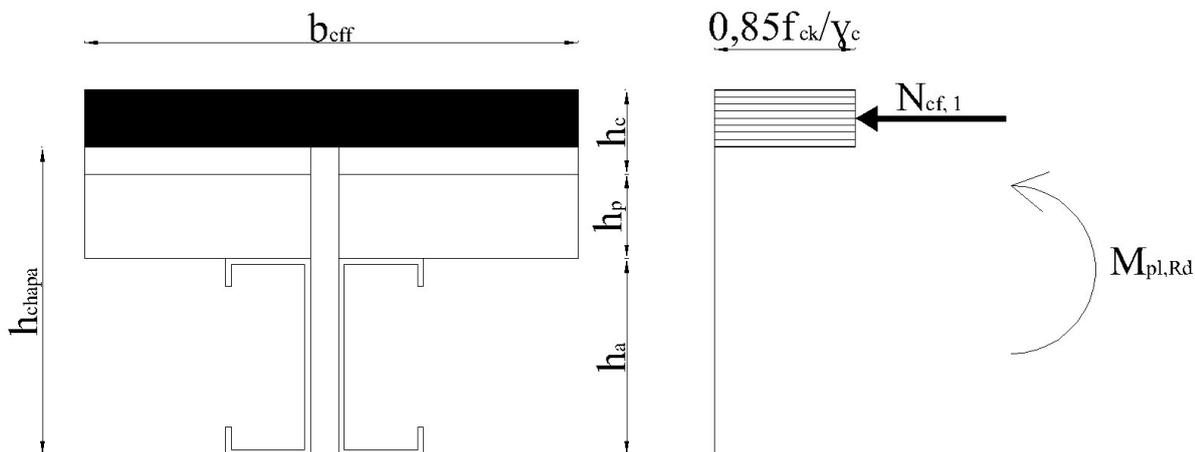


Figura 3.10 - Força de compressão no betão acima do conector quando o e.n. atravessa a laje maciça de betão.

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a + h_p, \text{ então } N_{cf,1} = b_{eff} \times (h_{total} - h_{chapa}) \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.9)$$

$$\text{Se } h_{chapa} \leq h_a + h_p, \text{ então } N_{cf,1} = N_{cf,tot}$$

em que:

$N_{cf,1}$ valor de cálculo do esforço normal de compressão no banzo de betão acima do conector com conexão total;

3.6.2 Forças aplicadas no perfil de secção “C”

A força de tração total dos perfis “C”, $N_{perfil,tot}$, é dada pela Equação (3.10) e está representada na Figura 3.11.

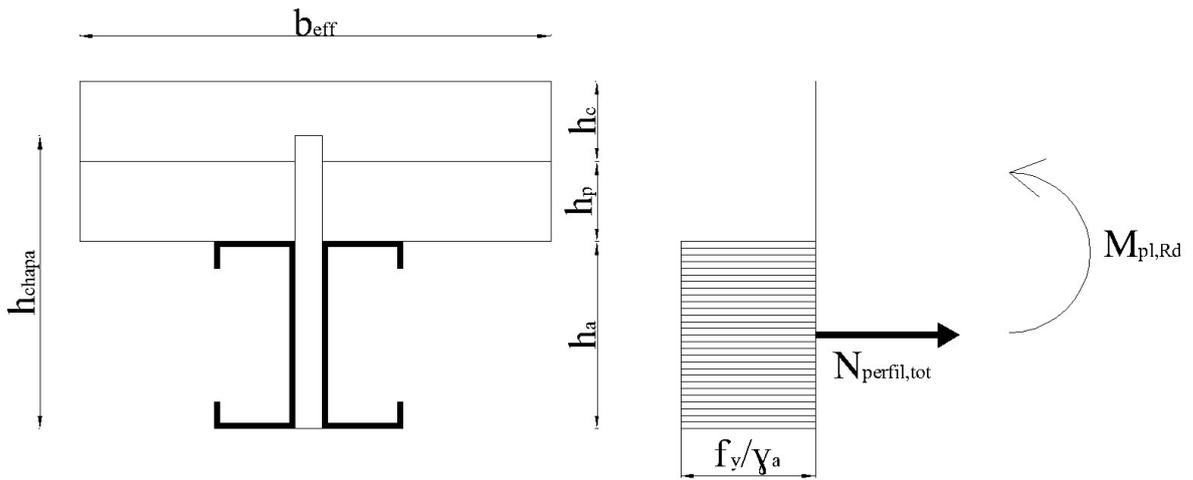


Figura 3.11 - Força de tração total dos perfis com secção "C".

$$N_{\text{perfil,tot}} = \frac{2 \cdot A_a \times f_y}{\gamma_a} \quad (3.10)$$

em que:

- $N_{\text{perfil,tot}}$ valor de cálculo total da resistência plástica da secção dupla em "C" sob efeito de esforço axial;
- A_a área da secção transversal "C" da secção de aço estrutural;
- f_y valor nominal da tensão de cedência do aço estrutural do perfil;
- γ_a coeficiente parcial para o aço do perfil;

A força de compressão localizada apenas nos banzos superiores dos dois perfis "C", $N_{\text{perfil,banzos,sup}}$, está representada na Figura 3.12 e é descrita através da Equação (3.11).

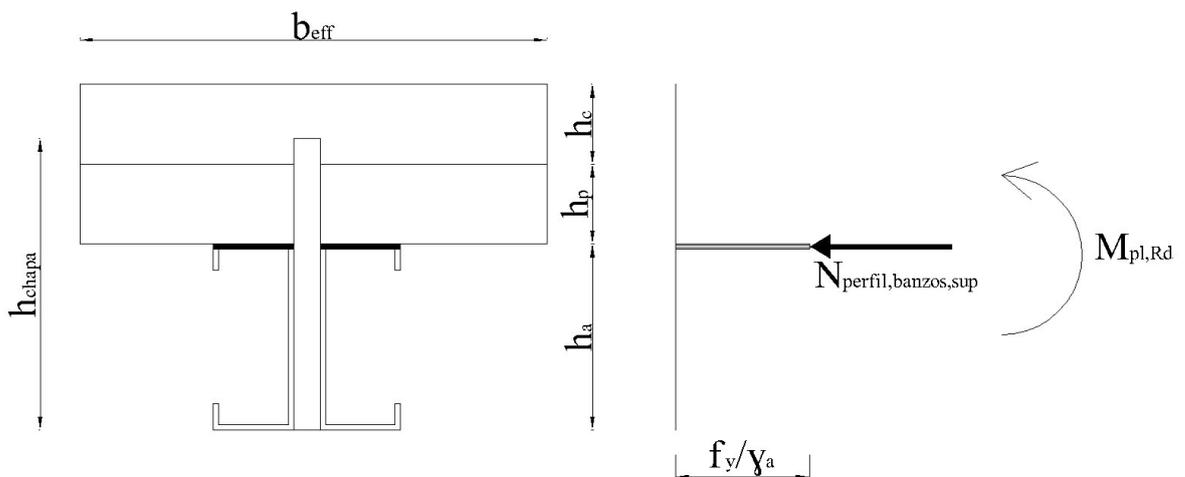


Figura 3.12 – Força de compressão nos banzos superiores dos perfis com secção "C".

$$N_{\text{perfil,banzos,sup}} = \frac{2 \cdot b \times t \times f_y}{\gamma_a} \quad (3.11)$$

em que:

- $N_{\text{perfil,banzos,sup}}$ valor de cálculo da resistência plástica dos banzos superiores da secção “C” de aço estrutural ao esforço normal;
- b largura do banzo da secção “C” de aço;
- t espessura da secção “C” de aço.

A força de tração nas abas superiores dos perfis “C”, $N_{\text{perfil,abas,sup}}$, é dada pela Equação (3.12) e pode ser visualizada na Figura 3.13.

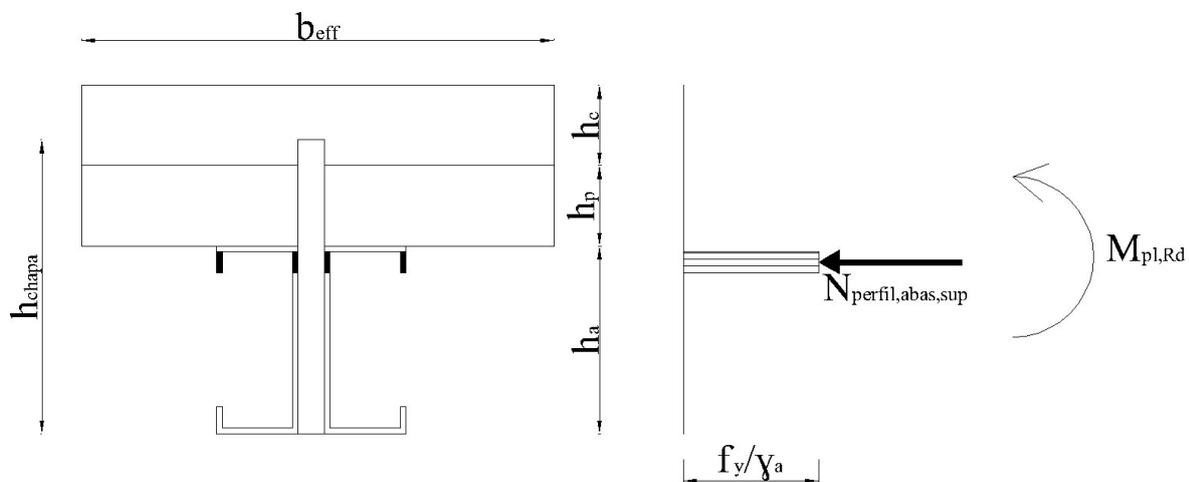


Figura 3.13 - Força de compressão nas abas superiores dos perfis com secção "C".

$$N_{\text{perfil,abas,sup}} = \frac{4 \cdot t \times (a - t) \times f_y}{\gamma_a} \quad (3.12)$$

em que:

- $N_{\text{perfil,abas,sup}}$ valor de cálculo da resistência plástica das abas superiores da secção “C” de aço estrutural ao esforço normal;
- a altura das abas da secção “C” de aço;

3.6.3 Forças aplicadas na chapa do conector

A força de tração total na chapa do conector, $N_{\text{chapa,tot}}$, encontra-se representada na Figura 3.14 e é calculada através da Equação (3.13).

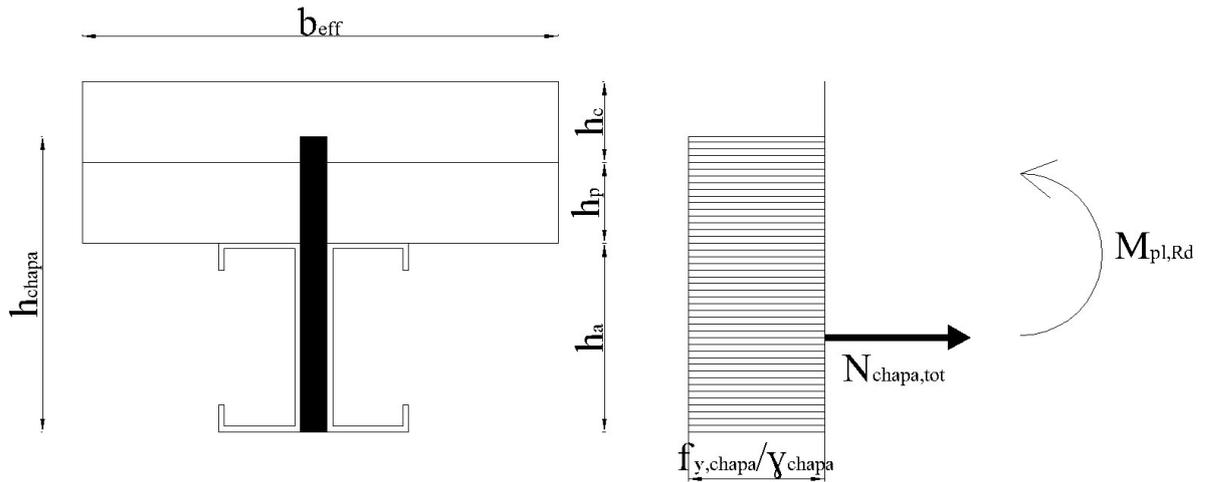


Figura 3.14 - Força de tração total da chapa do conector.

$$N_{chapa,tot} = \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \quad (3.13)$$

em que:

- $N_{chapa,tot}$ valor de cálculo total da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector ao esforço normal;
- $f_{y,chapa}$ valor nominal da tensão de cedência da chapa do conector de aço estrutural;
- γ_{chapa} coeficiente parcial para a chapa do conector de aço;

A força de tração da chapa do conector na altura total do perfil de secção "C", $N_{chapa,1}$, é calculada de acordo com a Equação (3.14) e está representada na Figura 3.15.

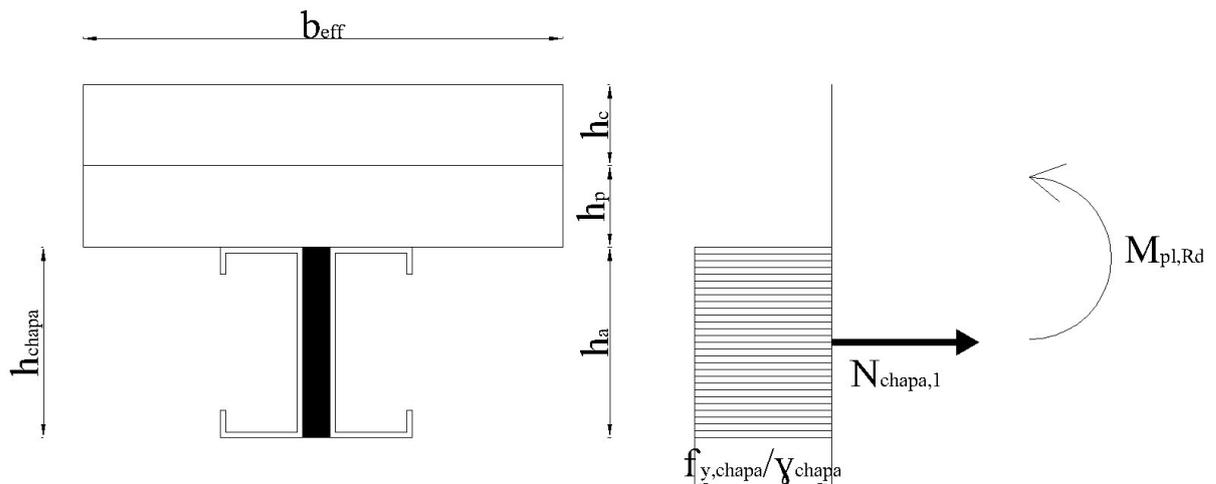


Figura 3.15 - Força de tração da chapa do conector na altura total do perfil de secção "C".

$$\begin{aligned} \text{Se } h_{chapa} \leq h_a, \text{ então} \quad N_{chapa,1} &= \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \\ \text{Se } h_{chapa} > h_a, \text{ então} \quad N_{chapa,1} &= \frac{e_{chapa} \times h_a \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

em que:

$N_{chapa,1}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector na altura do perfil de secção "C" ao esforço normal;

Na Figura 3.16 está representada a força de tração da chapa do conector na altura imediatamente abaixo das abas superiores do perfil de secção "C", $N_{chapa,1A}$. Esta força é descrita na Equação (3.15).

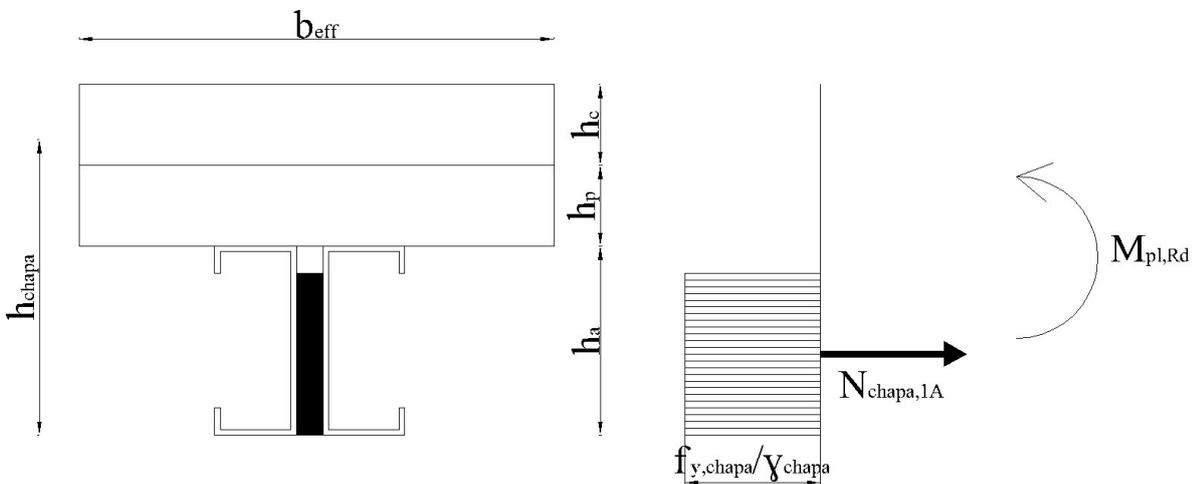


Figura 3.16 - Força de tração da chapa do conector na altura abaixo das abas superiores do perfil de secção "C".

$$\begin{aligned} \text{Se } h_a - h_{chapa} \leq a, \text{ então} \quad N_{chapa,1A} &= \frac{e_{chapa} \times (h_a - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \\ \text{Se } h_a - h_{chapa} > a, \text{ então} \quad N_{chapa,1A} &= \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

em que:

$N_{chapa,1A}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector na altura abaixo das abas do perfil de secção "C" ao esforço normal;

A força de tração (ou de compressão) na chapa do conector na altura das abas do perfil, $N_{chapa,1B}$, encontra-se representada na Figura 3.17 e o seu cálculo é efetuado com base na Equação (3.16).

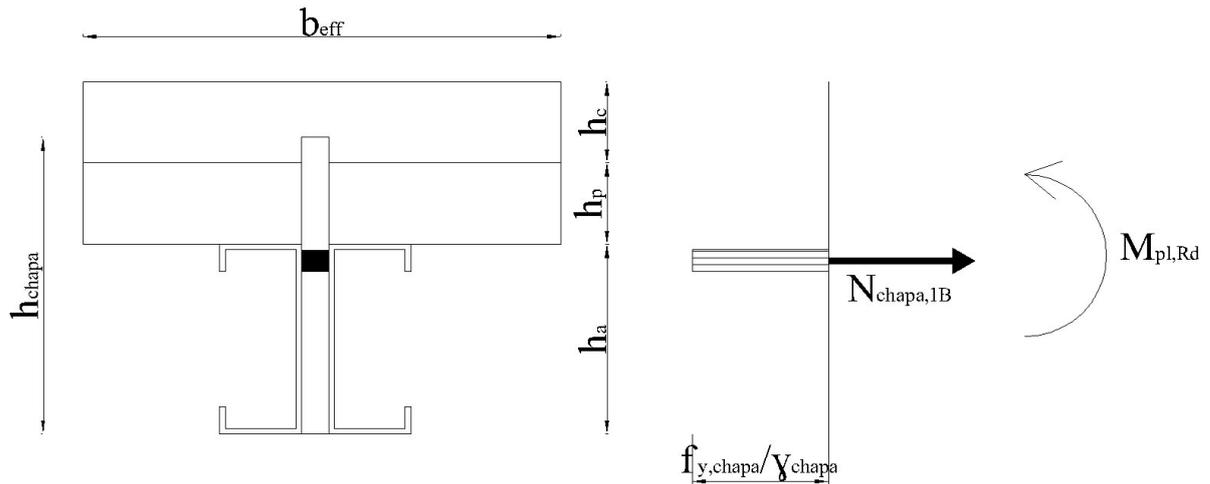


Figura 3.17 – Força de tração (ou de compressão) na chapa do conector, na altura das abas superiores do perfil de secção "C".

Se $h_{chapa} > h_a - a \wedge h_{chapa} < h_a - t$, então
$$N_{chapa,1B} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a + a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \quad (3.16)$$

Se $h_{chapa} > h_a - a \wedge h_{chapa} \geq h_a - t$, então
$$N_{chapa,1B} = \frac{e_{chapa} \times (a - t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}$$

em que:

$N_{chapa,1B}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector na altura das abas do perfil de secção "C" ao esforço normal;

Na Figura 3.18 pode-se observar a força de compressão da chapa do conector na altura da espessura dos banzos superiores do perfil "C", $N_{chapa,1C}$. O cálculo para esta força encontra-se descrito através da Equação (3.17).

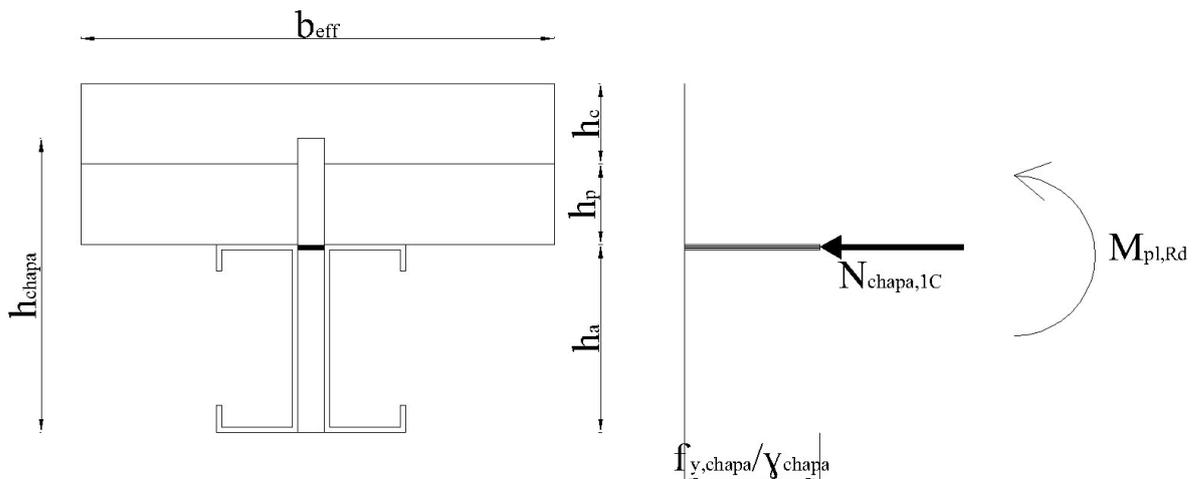


Figura 3.18 - Força de compressão da chapa do conector na altura da espessura dos banzos superiores do perfil de secção "C".

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a - t \wedge h_{chapa} \leq h_a, \text{ então } N_{chapa,1C} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a + t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \quad (3.17)$$

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a, \text{ então } N_{chapa,1C} = \frac{e_{chapa} \times t \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}$$

em que:

$N_{chapa,1C}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector na altura da espessura os banzos do perfil de secção “C” ao esforço normal;

A força de compressão da chapa do conector na altura da chapa perfilada, $N_{chapa,2}$, está representada na Figura 3.19 e é calculada com base na Equação (3.18) e (3.19).

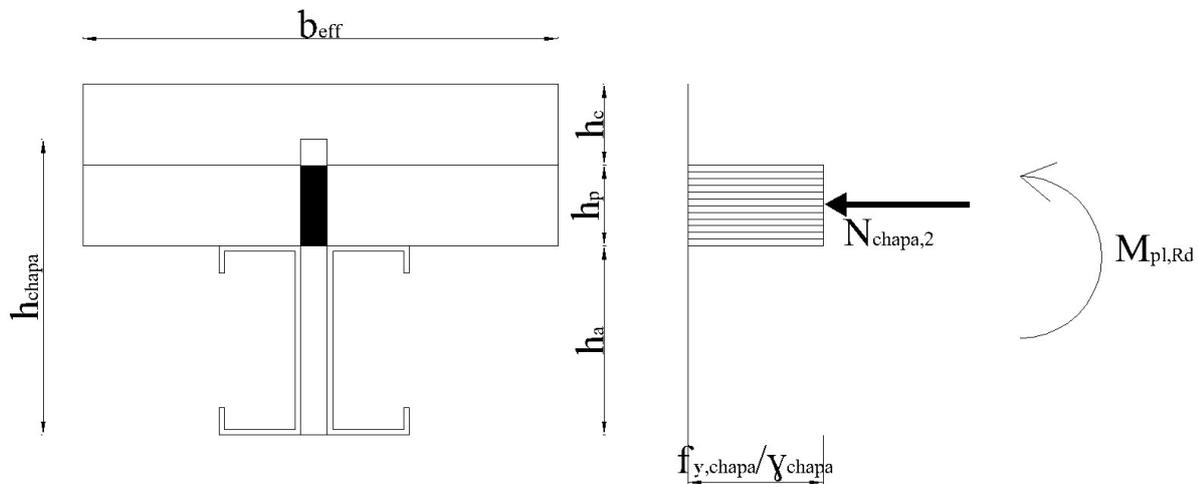


Figura 3.19 - Força de compressão da chapa do conector na altura da chapa perfilada.

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a + h_p, \text{ então } N_{chapa,2} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} - N_{chapa,3} \quad (3.18)$$

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a \wedge h_{chapa} \leq h_a + h_p, \text{ então } N_{chapa,2} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}$$

em que:

$N_{chapa,2}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector na altura da chapa perfilada ao esforço normal;

$N_{chapa,3}$ valor de cálculo da resistência plástica da chapa de aço estrutural do conector no interior da espessura da laje de betão ao esforço normal.

A força de compressão da chapa do conector dentro da espessura da laje maciça, $N_{chapa,3}$, é descrita pela Equação (3.19) e encontra-se representada na Figura 3.20.

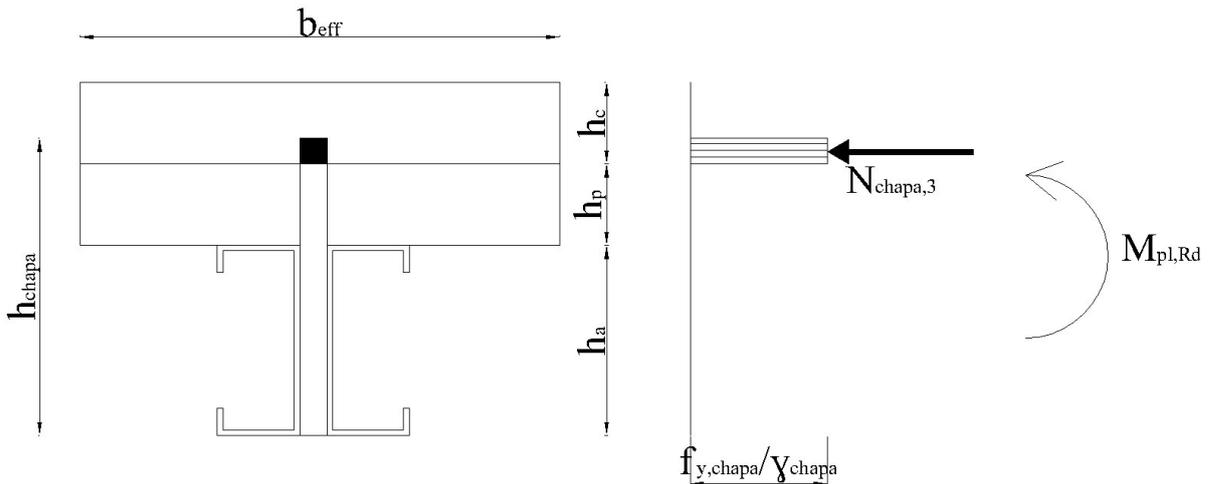


Figura 3.20 - Força de compressão da chapa do conector no interior da espessura da laje de betão.

$$\text{Se } h_{chapa} > h_a + h_p, \text{ então } N_{chapa,3} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + h_c) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \quad (3.19)$$

3.7 Profundidade do eixo neutro (cálculo plástico)

A primeira abordagem ao cálculo da posição do eixo neutro, e.n., consiste em determinar o Caso (A, B ou C) em que o provete selecionado se encontra.

De seguida procede-se ao cálculo da profundidade do eixo neutro, z , que é calculada para cada caso individualmente através da equação de equilíbrio de forças, onde o somatório das forças de compressão acima do e.n. têm que igual o somatório de forças de tração que estão abaixo do e.n..

Assim, a Equação (3.20) traduz a profundidade do e.n. para o Caso A.1, ou seja, quando o e.n. se encontra na laje maciça de betão e acima do conector. Neste caso o betão tracionado é desprezado.

$$\begin{aligned} \text{Forças de compressão} &= \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \frac{b_{eff} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} &= N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot} \end{aligned} \quad (3.20)$$

em que:

z eixo da secção transversal perpendicular aos banzos; profundidade do eixo neutro.

A profundidade do e.n. para o Caso A.2, onde o e.n. se situa na laje de betão e atravessa o conector é traduzida pela Equação (3.54) e neste caso o betão tracionado também é desprezado.

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow & \frac{b_{\text{eff}} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (z - h_{\text{total}} + h_{\text{chapa}}) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} - \\
& \frac{e_{\text{chapa}} \times (z - h_{\text{total}} + h_{\text{chapa}}) \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = \\
& = N_{\text{perfil,tot}} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (h_{\text{total}} - z) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}}
\end{aligned} \tag{3.21}$$

No caso A.3, quando eixo neutro se encontra localizado na chapa perfilada da laje, a profundidade do e.n. é traduzida pela Equação (3.56).

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow & N_{\text{cf,tot}} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (z - h_{\text{total}} + h_{\text{chapa}}) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} = N_{\text{perfil,tot}} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (h_{\text{total}} - z) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

O cálculo de z para Caso A.4, onde o e.n. se situa nos banzos superiores dos perfis de secção “C” é descrito pela Equação (3.57).

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow & N_{\text{cf,tot}} + N_{\text{chapa,2}} + N_{\text{chapa,3}} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (z - h_{\text{laje}}) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{\text{laje}}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
& = N_{\text{perfil,tot}} - \frac{2 \times b \times (z - h_{\text{laje}}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (h_{\text{total}} - z) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}}
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Para o cálculo de z do Caso A.5, onde o e.n. se situa nas abas superiores dos perfis de secção “C”, a Equação é a (3.24).

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow & N_{\text{cf,tot}} + N_{\text{perfil,banzos,sup}} + N_{\text{chapa,1C}} + N_{\text{chapa,2}} + N_{\text{chapa,3}} + \\
& + \frac{e_{\text{chapa}} \times (z - h_{\text{laje}} - t) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{\text{laje}} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \\
& = N_{\text{perfil,tot}} - N_{\text{perfil,banzos,sup}} - \frac{4 \times t \times (z - h_{\text{laje}} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{\text{chapa}} \times (h_{\text{total}} - z) \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Para o Caso A.6, em que o e.n. se situa no perfil abaixo das abas do mesmo, o cálculo de z programado no Excel é traduzido pela Equação (3.59).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Para o Caso B o processo de determinação de z , foi o mesmo, à exceção da situação em que o e.n. se situa na laje maciça, onde o conector não existe, pois a chapa do conector no Caso B não ultrapassa a altura da chapa nervurada.

A Equação (3.26) para a determinação da profundidade do eixo neutro diz respeito ao Caso B.1, em que o e.n. se situa na laje maciça de betão.

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & \frac{b_{eff} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} + N_{chapa,2}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Para a determinação de z no Caso B.3, onde o e.n. se situa na chapa perfilada, a Equação utilizada foi a (3.22).

No Caso B.4, quando o e.n. se localiza nos banzos superiores dos perfis “C”, o cálculo da profundidade do e.n., teve por base a Equação (3.27).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje}) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

No Caso B.5, em que o eixo neutro se situa nas abas superiores dos perfis “C”, a profundidade do e.n., foi calculada de acordo com a Equação (3.28).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Para o Caso B.6, onde o e.n. se localiza nos perfis “C” abaixo das abas superiores dos mesmos, o z foi calculado através da Equação (3.29).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

No Caso C existem menos hipótese de cálculo que nos casos anteriores, pois a chapa do conector tem uma altura máxima igual à altura dos perfis “C”, havendo apenas 4 hipóteses de cálculo (C.1, C.4, C.5 e C.6).

A Equação que traduz a profundidade do e.n. para o Caso C.1, onde o e.n. se situa na laje de betão é a (3.20).

O cálculo da determinação de z para o Caso C.4, onde o e.n. se situa nos banzos superiores dos perfis “C”, pode ser traduzido por duas equações:

- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} \geq h_a - t$, então utiliza-se a Equação (3.30);
- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} < h_a - t$, então utiliza-se a Equação (3.31).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + N_{chapa,tot}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Para o Caso C.5, em que o eixo neutro se situa nas abas superiores dos perfis “C”, o cálculo da profundidade do e.n. é efetuado com base em duas equações dependendo das seguintes condições:

- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} \geq h_a - a$, então utiliza-se a Equação (3.32);
- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} < h_a - a$, então utiliza-se a Equação (3.33).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \quad (3.32) \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \quad (3.33) \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + N_{chapa,tot}
 \end{aligned}$$

Por fim no Caso C.6, quando o e.n. se localiza nos perfis “C” abaixo das abas superiores dos mesmos, a profundidade do eixo neutro é calculada com base na Equação (3.34).

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \quad (3.34) \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}}
 \end{aligned}$$

3.8 Momento plástico resistente

A determinação do momento plástico resistente, $M_{pl,Rd}$, baseia-se no equilíbrio de momentos, tendo como referência um ponto O , ponto esse que poderá variar consoante os casos de cálculo existentes.

No Caso A.1 a equação que traduz esse equilíbrio é a Equação (3.35). A Figura 3.21 representa as forças aplicadas na viga mista, bem como o ponto (O) em relação ao qual se efetua o equilíbrio de momentos.

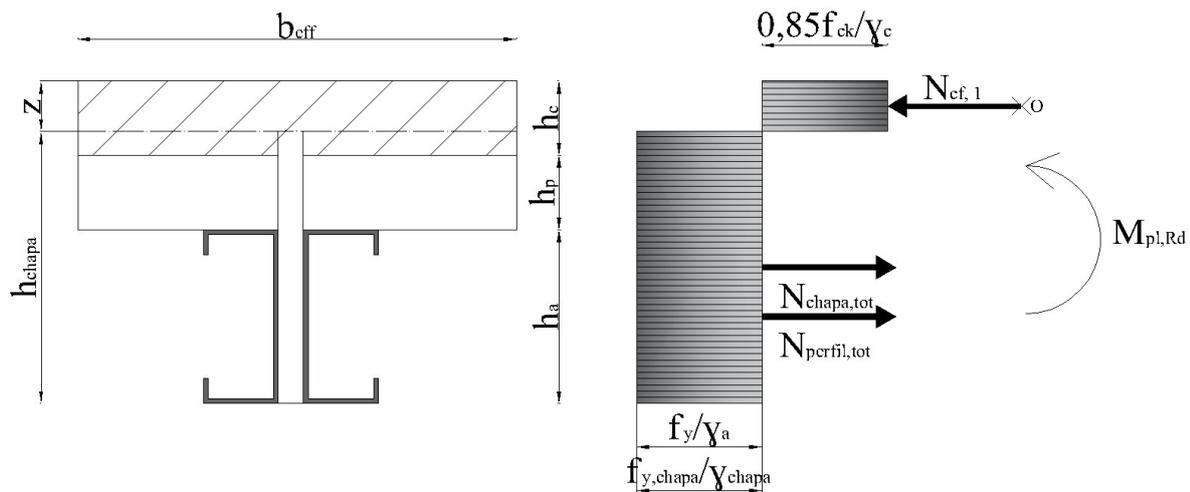


Figura 3.21 - Caso A.1: eixo neutro na laje de betão, acima do conector.

$$M_{pl,Rd} = N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot z \right) + N_{chapa,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_{chapa} - \frac{1}{2} \cdot z \right) \quad (3.35)$$

em que:

$M_{pl,Rd}$ valor de cálculo do momento fletor resistente plástico da secção de aço estrutural;

Para o Caso A.2 representado na Figura 3.22, o momento plástico resistente é traduzido pela Equação (3.36).

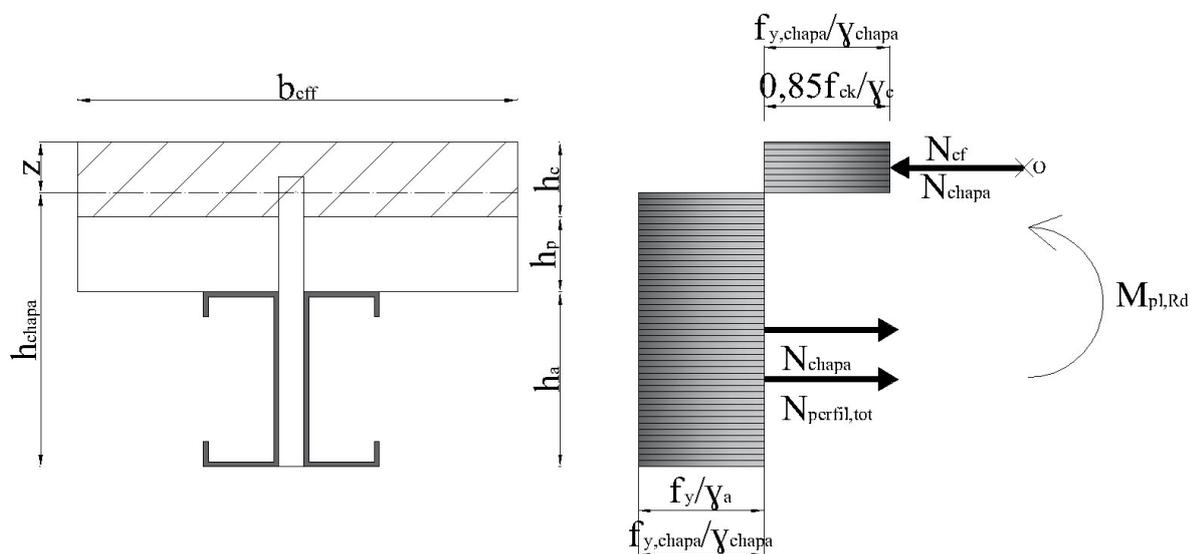


Figura 3.22 - Caso A.2: eixo neutro na laje de betão, atravessando o conector.

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot z \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{1}{2} \cdot z \right) - \\
 & - \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\left(h_{total} - \frac{z}{2} \right) - (h_{total} - z) - \left(\frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) \right)
 \end{aligned} \quad (3.36)$$

O cálculo do $M_{pl,Rd}$ para o Caso A.3 (ver Figura 3.23), é efetuado de acordo com a Equação (3.37).

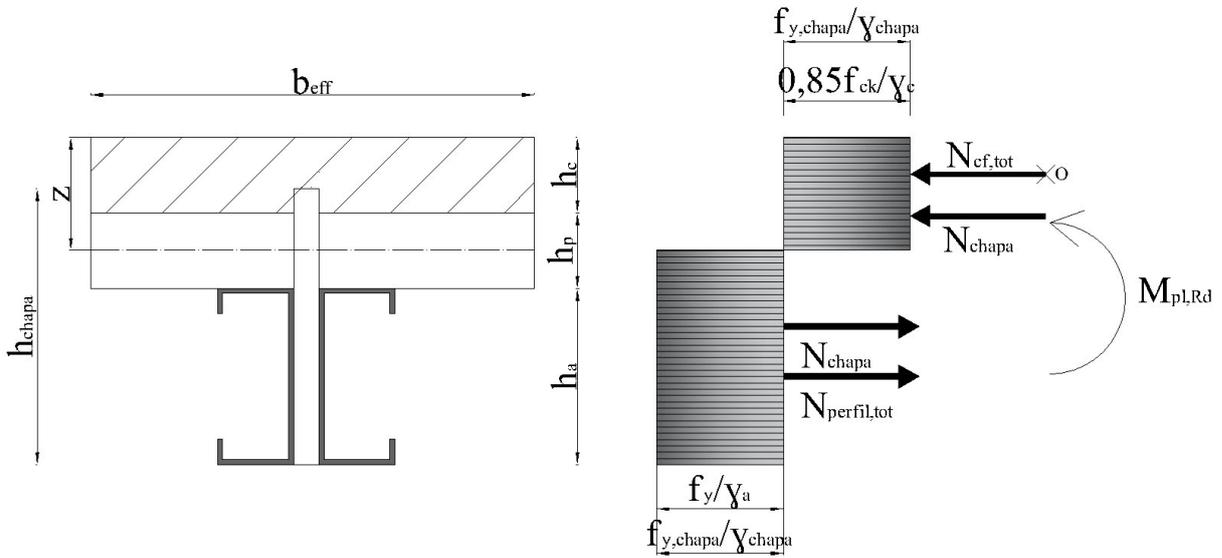


Figura 3.23 - Caso A.3: eixo neutro na chapa perfurada.

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot h_c \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(h_{total} - \frac{h_c}{2} - \frac{h_{total} - z}{2} \right) - \\
 & - \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(z - \frac{h_c}{2} - \left(\frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) \right)
 \end{aligned} \quad (3.37)$$

No Caso A.4 (ver Figura 3.24) o momento plástico resistente é calculado com base na Equação (3.38).

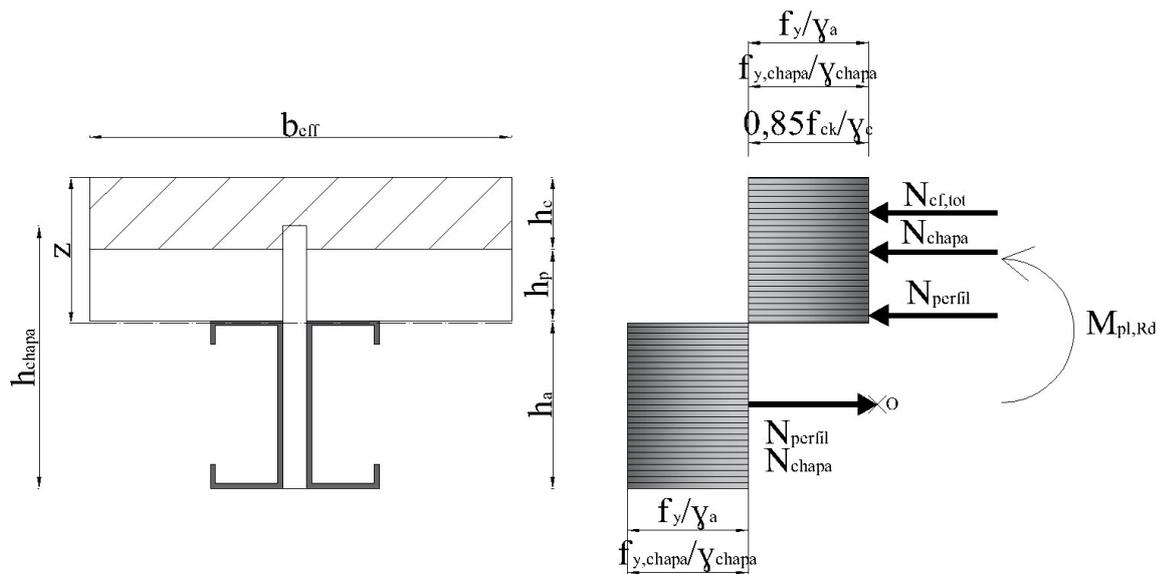


Figura 3.24 - Caso A.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C".

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
 & + \frac{2 \cdot b(z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (3.38)$$

O cálculo do momento plástico resistente para o Caso A.5 é descrito pela Equação (3.39) e pode ser visualizado na Figura 3.25.

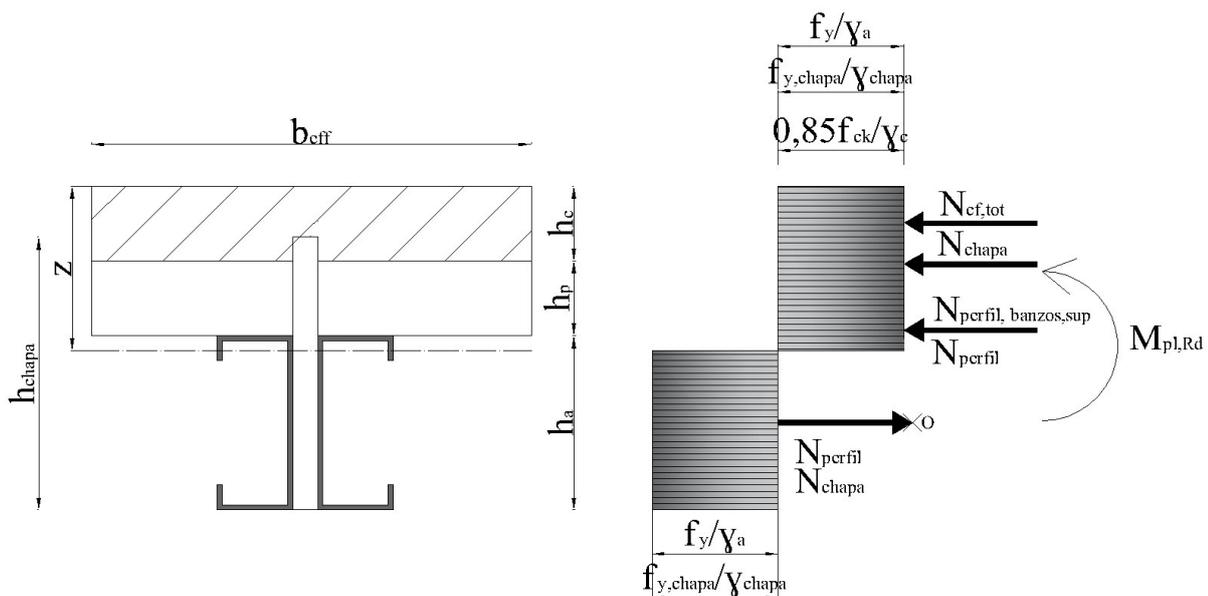


Figura 3.25 - Caso A.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C".

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + \frac{4 \cdot t(z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

No Caso A.6 o $M_{pl,Rd}$ é apresentado na Figura 3.26 e é descrito de acordo com a Equação (3.40).

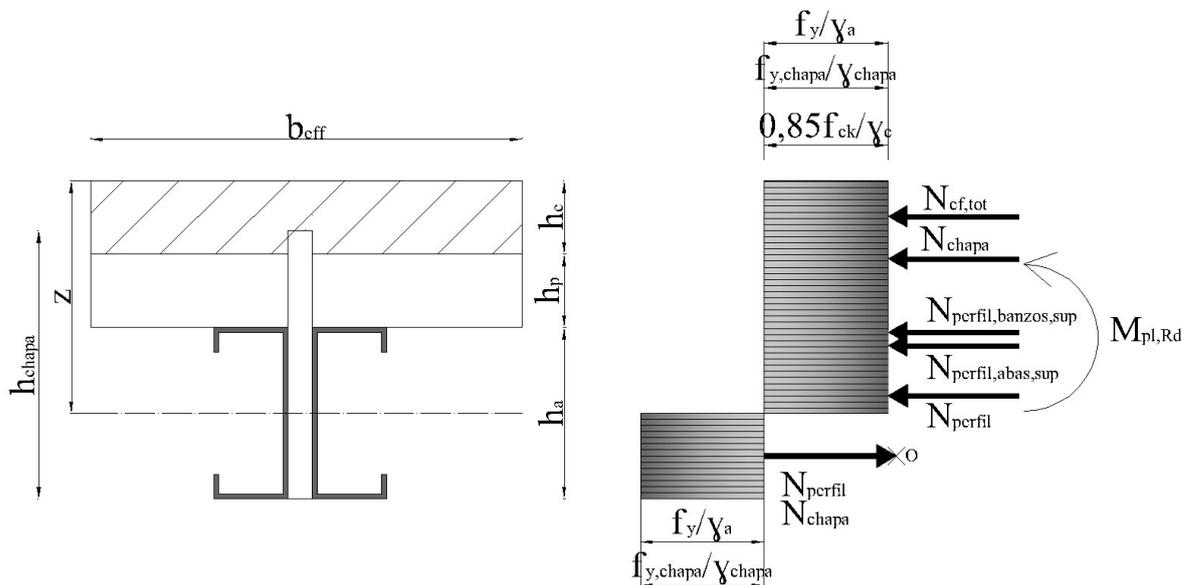


Figura 3.26 - Caso A.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,abas,sup} \times \left(z - h_{laje} - a + \frac{a - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + \frac{2 \times t \cdot (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - a}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

O cálculo para a determinação do momento plástico resistente para o Caso B.1 (ver Figura 3.27), é traduzido pela Equação (3.41).

$$M_{pl,Rd} = N_{perfil,tot} \times \left(\frac{1}{2} \cdot h_a + h_{laje} - \frac{1}{2} \cdot z \right) + (N_{chapa,1} + N_{chapa,2}) \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_{chapa} - \frac{1}{2} \cdot z \right) \quad (3.41)$$

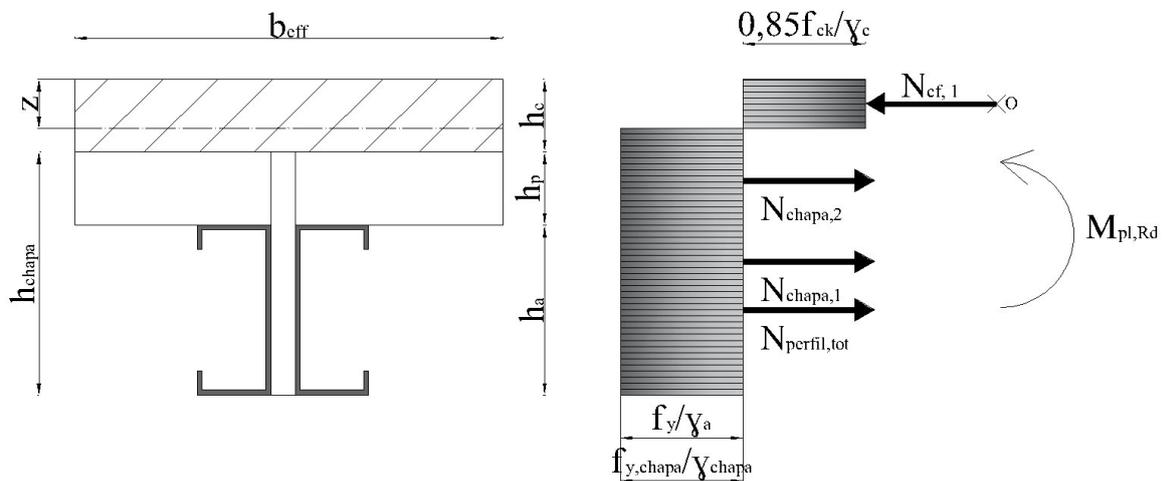


Figura 3.27 - Caso B.1: eixo neutro na laje de betão.

Para o Caso B.3, o qual pode ser visualizado na Figura 3.28, o momento plástico resistente é calculado com base na Equação (3.37).

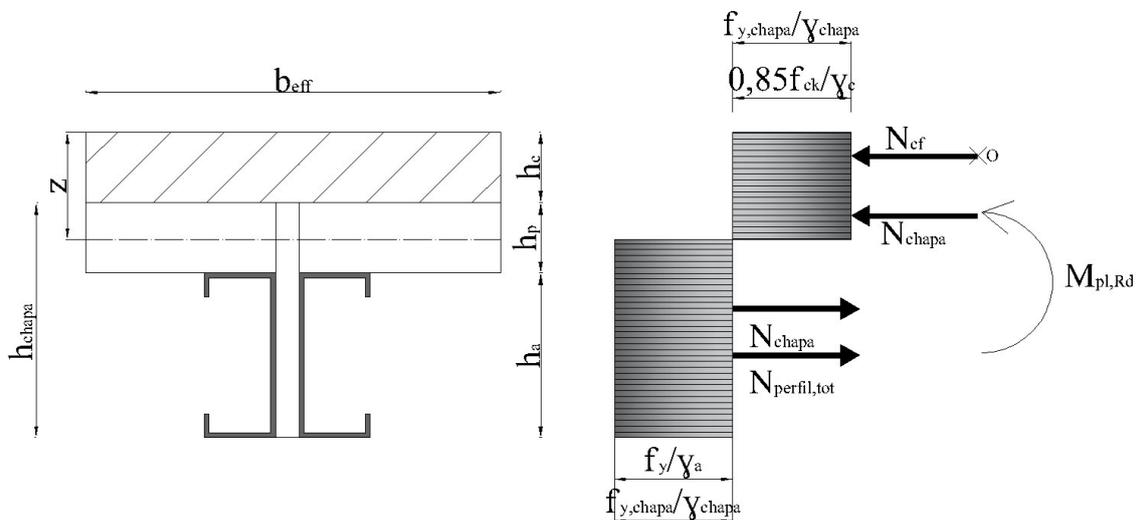


Figura 3.28 - Caso B.3: eixo neutro na chapa perfilada.

No Caso B.4 representado na Figura 3.29, o cálculo do momento plástico resistente é realizado de acordo com a Equação (3.38).

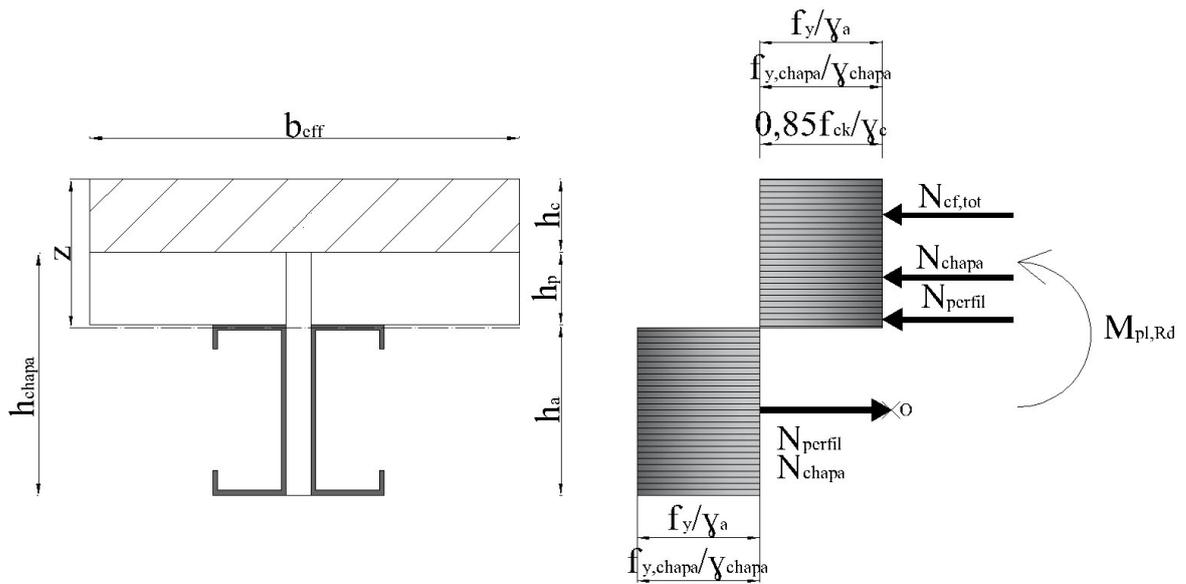


Figura 3.29 - Caso B.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C".

O Caso B.5 encontra-se representado na Figura 3.30 e o momento fletor resistente, $M_{pl,Rd}$, é calculado através da Equação (3.39).

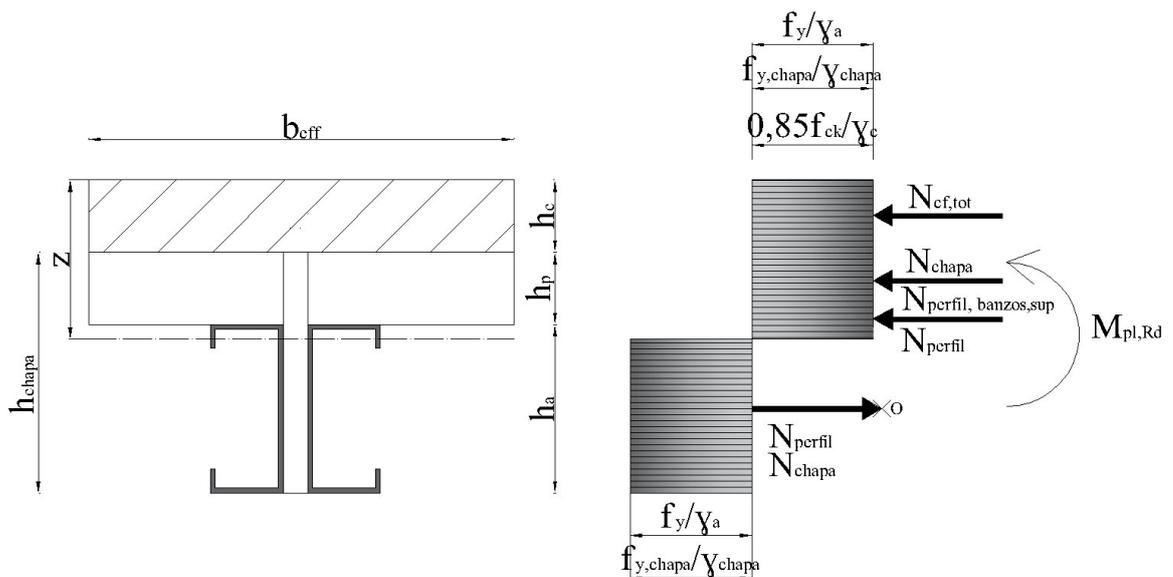


Figura 3.30 - Caso B.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C".

O cálculo do momento plástico resistente para o Caso B.6, encontra-se representado na Figura 3.31 e é descrito pela Equação (3.40).

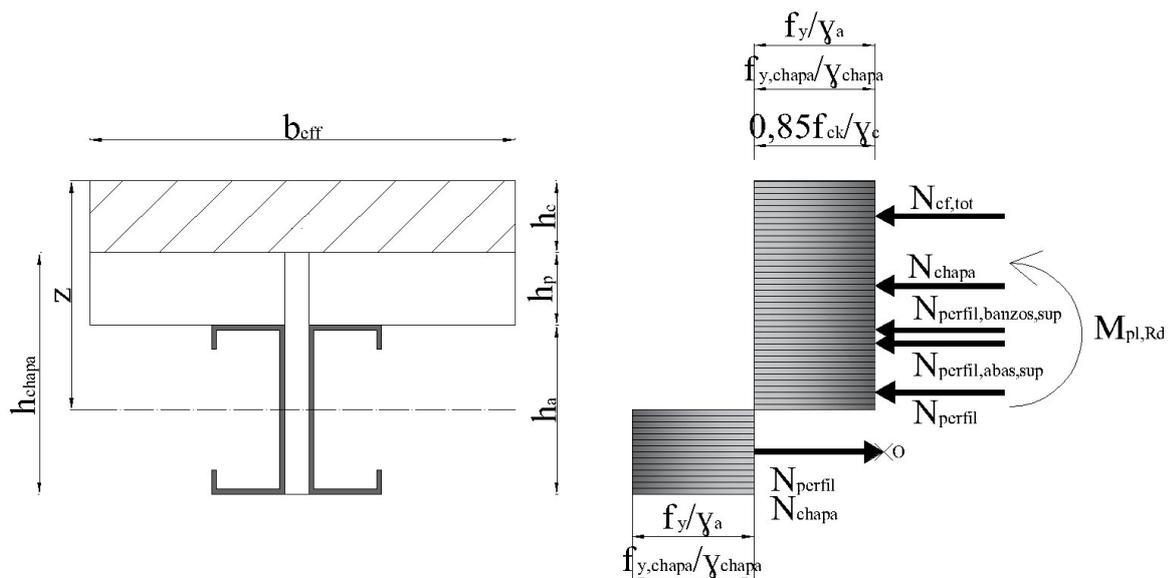


Figura 3.31 - Caso B.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.

Para o Caso C.1, que pode ser visualizado na Figura 3.32, a Equação que traduz o cálculo do momento plástico resistente é a (3.35).

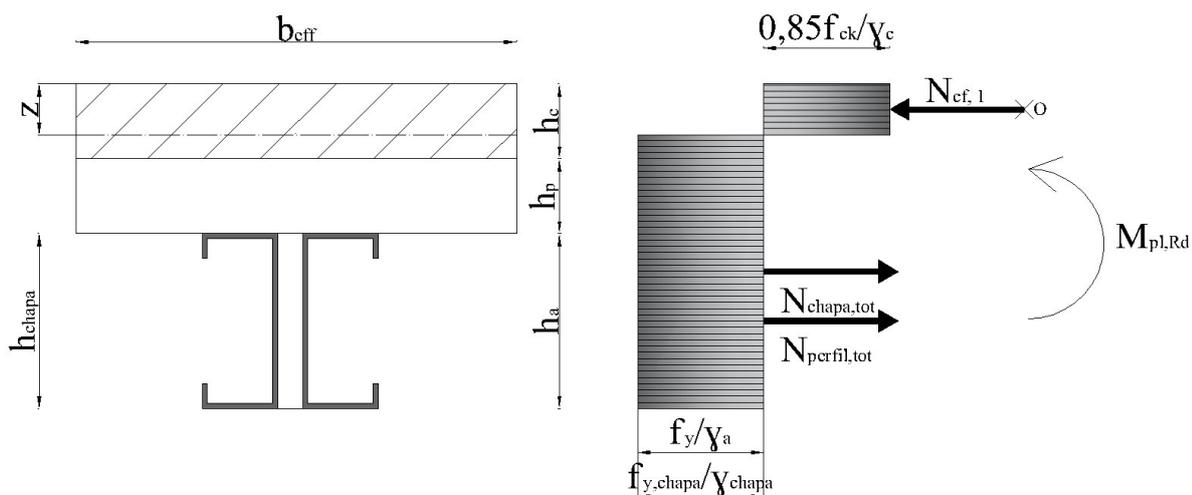


Figura 3.32 - Caso C.1: eixo neutro na laje de betão.

No caso C.4 o momento plástico resistente pode ser calculado por duas equações dependendo das seguintes condições:

- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} \geq h_a - t$, então utiliza-se a Equação (3.42) (ver Figura 3.33(a));
- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} < h_a - t$, então utiliza-se a Equação (3.43) (ver Figura 3.33(b)).

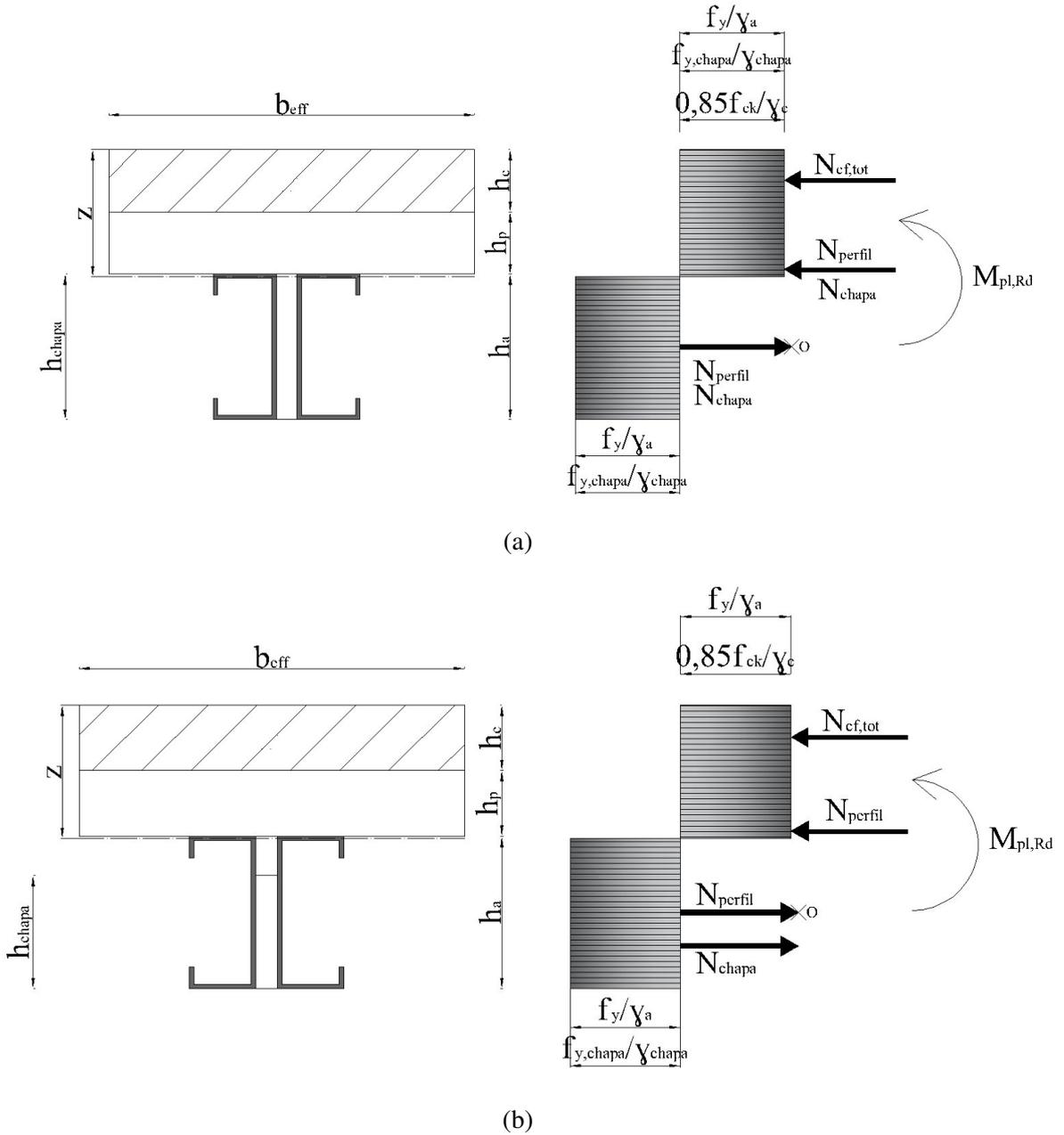


Figura 3.33 - Caso C.4: eixo neutro nos banzos superiores dos perfis "C".

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right) + \\
 & + \frac{2 \cdot b \cdot (z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
& + \frac{2 \cdot b(z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
& + \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_a}{2} - \frac{h_{chapa}}{2} \right)
\end{aligned} \tag{3.43}$$

O cálculo do momento plástico resistente para o Caso C.5 é descrito também por duas equações dependentes de duas condições:

- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} \geq h_a - a$, então utiliza-se a Equação (3.44) (ver Figura 3.34(a));
- Se $h_{chapa} \leq h_a \wedge h_{chapa} < h_a - a$, então utiliza-se a Equação (3.45) (ver Figura 3.34(b)).

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
& + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
& + \frac{4 \cdot t(z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) \\
& + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right)
\end{aligned} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
& + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
& + \frac{4 \cdot t(z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) \\
& + \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_a}{2} - \frac{h_{chapa}}{2} \right)
\end{aligned} \tag{3.45}$$

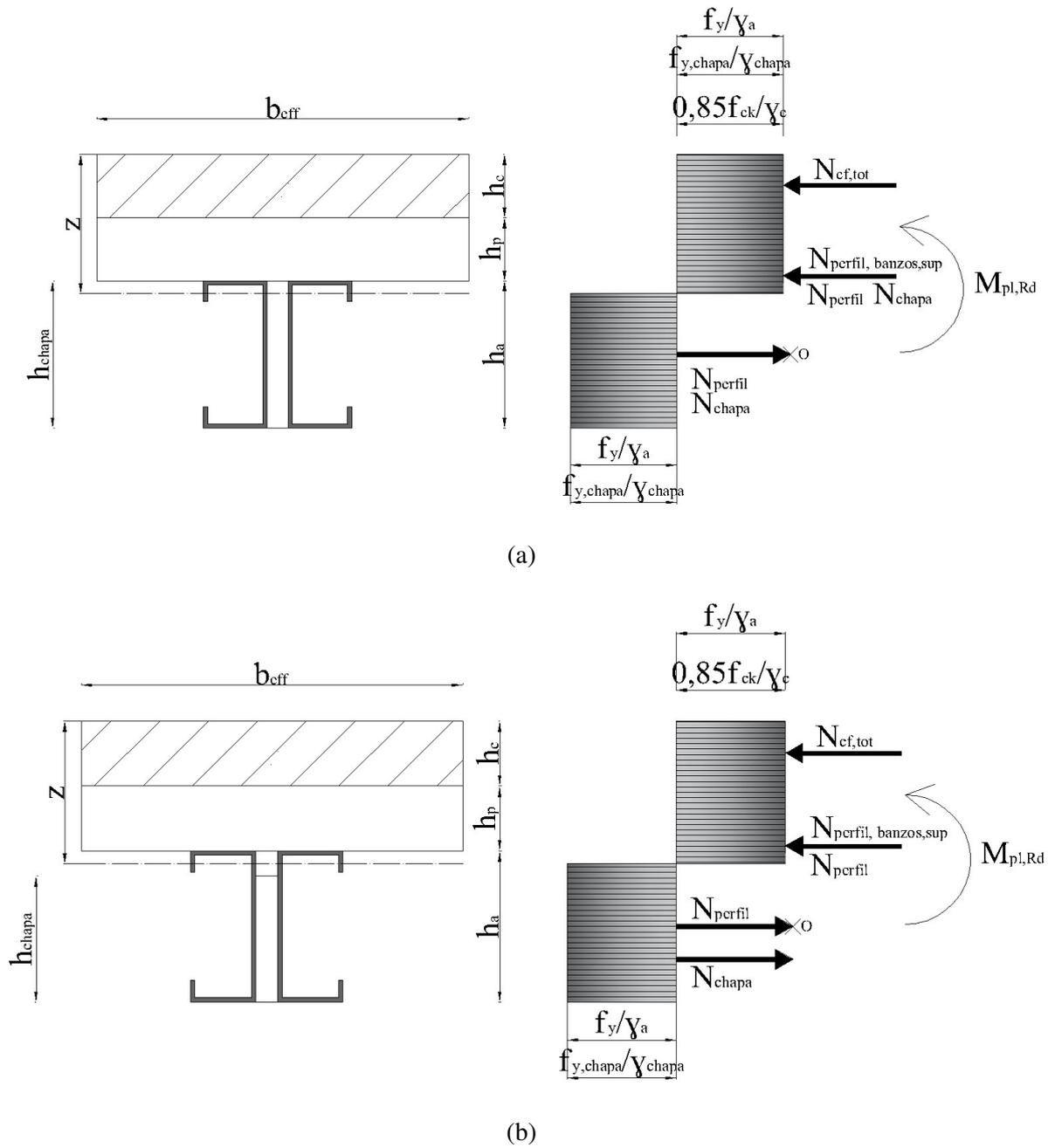


Figura 3.34 - Caso C.5: eixo neutro nas abas superiores dos perfis "C".

Por fim, o cálculo do momento plástico resistente para o Caso C.6, que encontra representado na Figura 3.35, é realizado de acordo com a Equação (3.46).

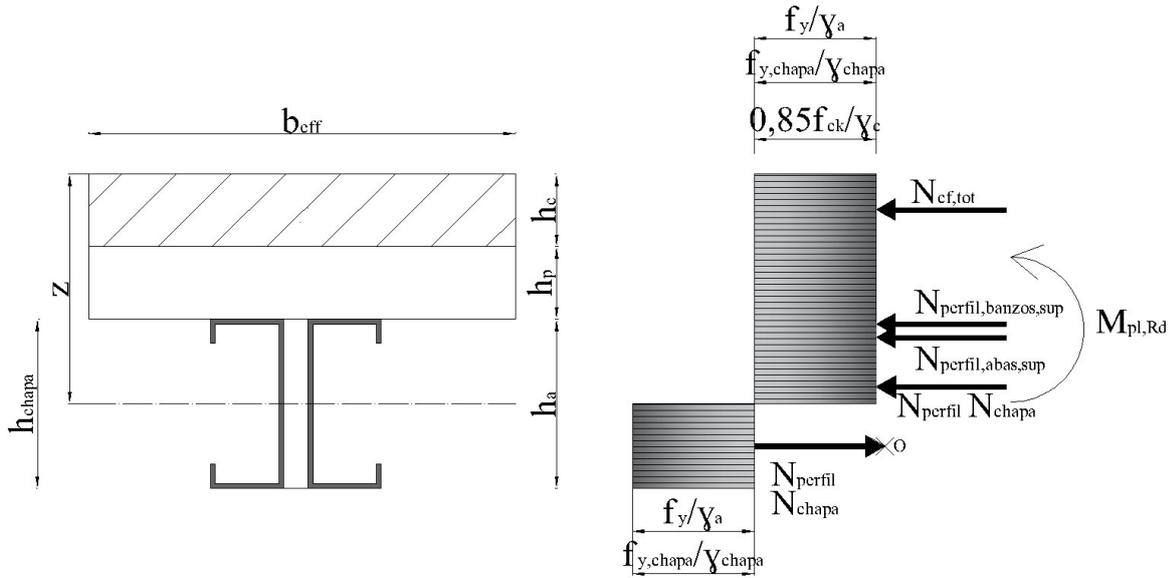


Figura 3.35 - Caso C.6: eixo neutro nos perfis "C", abaixo das abas superiores dos mesmos.

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,abas,sup} \times \left(z - h_{laje} - a + \frac{a - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + \frac{2 \times t \cdot (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - a}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

3.9 Seleção das hipóteses de cálculo

Posteriormente à definição das equações apresentadas anteriormente, programa-se a seleção da hipótese de cálculo correta. Para que isso seja possível, determina-se a posição do eixo neutro pelo equilíbrio de forças, de modo a obter apenas uma solução para cada Caso (A, B e C). Tal foi conseguido, com as condições de verificação associadas a cada hipótese e detalhadas na Tabela 3.2.

A condição a ser respeitada dir-nos-á a hipótese correta (Casos A, B ou C), definindo a localização do eixo neutro e a sua profundidade.

No Caso B, o valor de $N_{chapa,3}$ é de zero e no Caso C os valores das forças $N_{chapa,2}$ e $N_{chapa,3}$ também são de zero. Deste modo, as equações de verificação da localização do eixo neutro, são as mesmas nos três Casos, apenas o valor das forças é que se vai alterando.

Após existir só uma solução por Caso, ou seja 3 soluções, é que se procedeu à programação da solução final correta. As condições para esta seleção foram as seguintes:

- Caso A: $h_{chapa} > h_a + h_p$;
- Caso B: $h_{chapa} > h_a$ e $h_{chapa} \leq h_a + h_p$;
- Caso C: $h_{chapa} \leq h_a$.

Deste modo, obteve-se como soluções finais a localização do eixo neutro e o momento plástico resistente, para o provete selecionado nos dados de entrada (ver Figura 3.36).

Tabela 3.2 - Condições para a determinação da posição do eixo neutro para as hipóteses inseridas nos Casos A, B e C.

		Condições
		CASOS A, B e C
	Caso A.2 $N_{cf,1} \leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot}$ \wedge $N_{cf,tot} + N_{chapa,3} > N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} + N_{chapa,2}$	
	Caso A.3 Caso B.3 $N_{cf,tot} + N_{chapa,3} \leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} + N_{chapa,2}$ \wedge $N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} > N_{perfil,tot} + N_{chapa,1}$	
	Caso A.4 Caso B.4 Caso C.4 $N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} \leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,1}$ \wedge $N_{cf,tot} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + N_{perfil,banzos,sup} >$ $> N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1A} + N_{chapa,1B}$	
	Caso A.5 Caso B.5 Caso C.5 $N_{cf,tot} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + N_{perfil,banzos,sup} \leq$ $\leq N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1A} + N_{chapa,1B}$ \wedge $N_{cf,tot} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} >$ $> N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1A}$	
	Caso A.6 Caso B.6 Caso C.6 $N_{cf,tot} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} \leq$ $\leq N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1A}$	

Momento plástico resistente		
Mpl,Rd	✓	72,73 kN.m

Posição do eixo neutro		
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil

Figura 3.36 - Apresentação final dos resultados das características plásticas.

3.10 Cálculo das características elásticas da secção transversal

Nesta secção, considera-se o dimensionamento das características elásticas da secção transversal, considerando apenas a flexão positiva.

Para tal, é necessário determinar o centro de gravidade da secção total, y_G , o que é feito de acordo com a Equação (3.47).

$$y_G = \frac{2 \times A_a \times \frac{h_a}{2} + \frac{b_{eff}}{n} \times h_c \times \left(\frac{h_c}{2} + h_p + h_a \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \frac{h_{chapa}}{2}}{2 \times A_a + \frac{b_{eff}}{n} \times h_c + e_{chapa} \times h_{chapa}} \quad (3.47)$$

em que:

y_G eixo do centro de gravidade da secção transversal total paralela aos banzos.

Através deste cálculo consegue-se perceber se o eixo neutro está ao nível da laje de betão, se está ao nível da chapa perfilada ou se está ao nível do perfil “C”, caso A, B e C respetivamente.

Assim temos:

- Caso A: se eixo neutro (e.n.) na laje de betão - $y_G > h_a + h_p$;
- Caso B: se eixo neutro (e.n.) na chapa perfilada - $y_G > h_a$;
- Caso C: se eixo neutro (e.n.) no perfil metálico - $y_G \leq h_a$.

No caso A, após o início da fendilhação, a zona de betão tracionada deixa de contribuir para a capacidade resistente da secção. No entanto, ambos os materiais, aço e betão, se mantêm a funcionar em regime elástico, sendo necessário calcular o novo baricentro, desprezando-se o betão tracionado. Numa secção onde ambos os materiais funcionam em regime elástico, a posição do eixo neutro é calculada, igualando o momento estático da secção de betão comprimida ao momento estático da secção de aço tracionada.

Deste modo, procede-se então ao cálculo da profundidade do e.n., z , o momento de inercia, I_m , a tensão máxima de tração nas fibras inferiores do perfil de aço e a tensão máxima de compressão nas fibras superiores da laje de betão.

Para o Caso A, em que o eixo neutro se situa na laje de betão, a profundidade do e.n. é calculada com base nas Equações (3.48), (3.49) e (3.50) (ver Figura 3.37).

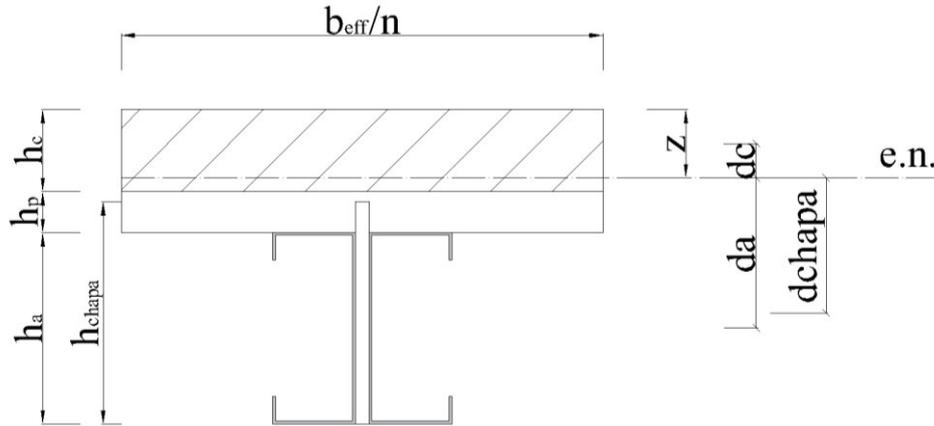


Figura 3.37 - Caso A: eixo neutro na laje de betão

$$S_c = A_c \times d_c = \frac{b_{eff}}{n} \times z \times \frac{z}{2} = \frac{b_{eff}}{n} \times \frac{z^2}{2} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} S_a &= 2 \cdot A_a \times d_a + A_{chapa} \times d_{chapa} = \\ &= 2 \cdot A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_p + h_c - z \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - z - \frac{h_{chapa}}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$S_c = S_a \Leftrightarrow \frac{b_{eff}}{n} \times \frac{z^2}{2} = 2 \cdot A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_p + h_c - z \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - z - \frac{h_{chapa}}{2} \right) \quad (3.50)$$

em que:

A_{chapa} área da secção transversal da chapa do conector de aço estrutural;

A_c área da secção transversal do betão;

S_a momento estático da secção de aço estrutural;

S_c momento estático da secção de betão não fendilhada;

d_a distância entre o centro de gravidade da secção de aço estrutural e a posição do eixo neutro;

d_c distância entre o centro de gravidade da secção de betão não fendilhada e a posição do eixo neutro;

d_{chapa} distância entre o centro de gravidade da secção da chapa do conector de aço estrutural e a posição do eixo neutro

De seguida procede-se à determinação do momento de inércia, de acordo com as Equações (3.51), (3.52), (3.53), (3.54), (3.55) e (3.56).

$$I_c = \frac{\frac{b_{eff}}{n} \times z^3}{12} \quad (3.51)$$

$$I_{chapa} = \frac{e_{chapa} \times h_{chapa}^3}{12} \quad (3.52)$$

$$d_a = \frac{h_a}{2} + h_p + h_c - z \quad (3.53)$$

$$d_c = \frac{z}{2} \quad (3.54)$$

$$d_{chapa} = h_{total} - z - \frac{h_{chapa}}{2} \quad (3.55)$$

$$I_m = \left(2 \cdot I_a + 2 \cdot A_a \times d_a^2\right) + \left(I_c + A_c \times d_c^2\right) + \left(I_{chapa} + A_{chapa} \times d_{chapa}^2\right) \quad (3.56)$$

em que:

I_a momento de inércia da secção de aço estrutural;

I_c momento de inércia da secção de betão não fendilhada;

I_{chapa} momento de inércia da secção da chapa do conector de aço estrutural;

I_m momento de inércia da secção efetiva homogeneizada em aço, desprezando o betão tracionado.

Por fim, é necessário verificar as condições de segurança relativamente às tensões para o momento fletor positivo atuante, para tal efetua-se os cálculos da tensão máxima de tração nas fibras inferiores do perfil de aço, σ_a , e da tensão máxima de compressão nas fibras superiores da laje de betão, σ_c , com base nas Equações (3.57), (3.58) e (3.59).

$$z_m = h_a + h_p + h_c - z \quad (3.57)$$

$$\sigma_a = \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z_m \Leftrightarrow \sigma_a < \frac{f_y}{\gamma_a} \rightarrow OK! \quad (3.58)$$

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \cdot \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z \Leftrightarrow \sigma_c < \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \rightarrow OK! \quad (3.59)$$

em que:

z_m eixo da secção transversal perpendicular aos banzos; altura do eixo neutro;

σ_a tensão máxima de tração nas fibras inferiores do perfil de aço, resultante do momento fletor M_{Ed} ;

σ_c tensão máxima de compressão nas fibras superiores da laje de betão, resultante do momento fletor M_{Ed} .

No caso B, procede-se à determinação das mesmas variáveis, ou seja, z , I_m , σ_a e σ_c (ver Figura 3.38 - Caso B: eixo neutro Figura 3.38), sendo as respetivas equações semelhantes às anteriores, no entanto, existem algumas diferenças como se pode verificar nas Equações (3.60), (3.61), (3.62), (3.63) e (3.64). As restantes variáveis que não estão presentes nestas equações, significa que o seu cálculo é igual ao cálculo das Equações mencionadas no Caso A.

$$S_c = A_c \times d_c = \frac{b_{eff}}{n} \times h_c \times \left(z - \frac{h_c}{2} \right) \quad (3.60)$$

$$\begin{aligned} S_a &= 2 \cdot A_a \times d_a + A_{chapa} \times d_{chapa} = \\ &= 2 \cdot A_a \times \left(h_{total} - \frac{h_a}{2} - z \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - z - \frac{h_{chapa}}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} S_c &= S_a \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow z &= \frac{\frac{b_{eff}}{n} \times \frac{h_c^2}{2} + 2 \cdot A_a \times \left(h_{total} - \frac{h_a}{2} \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - \frac{h_{chapa}}{2} \right)}{\frac{b_{eff}}{n} \times h_c + 2 \cdot A_a + e_{chapa} \times h_{chapa}} \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$I_c = \frac{\frac{b_{eff}}{n} \times h_c^3}{12} \quad (3.63)$$

$$d_c = z - \frac{h_c}{2} \quad (3.64)$$

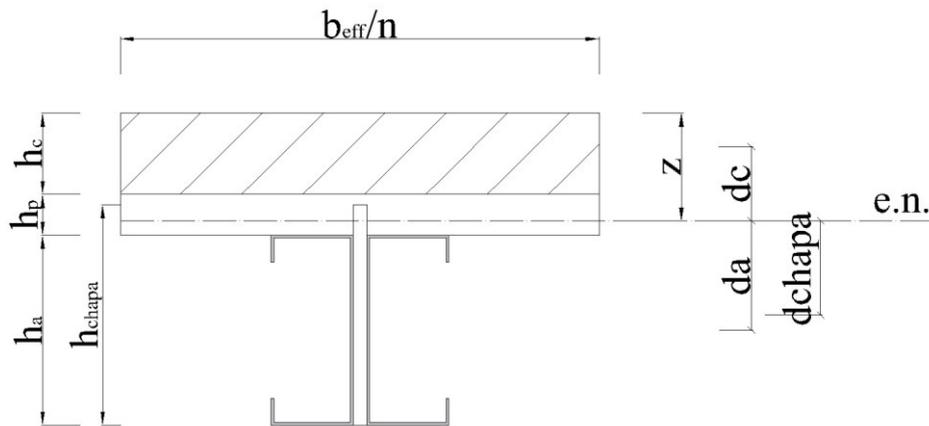


Figura 3.38 - Caso B: eixo neutro na chapa perfurada.

Para o Caso C as equações para a determinação de z , I_m , σ_a e σ_c , são as mesmas que foram mencionadas para o Caso B. A Figura 3.39 apresenta as variáveis utilizadas para os cálculos, bem como a posição do e.n..

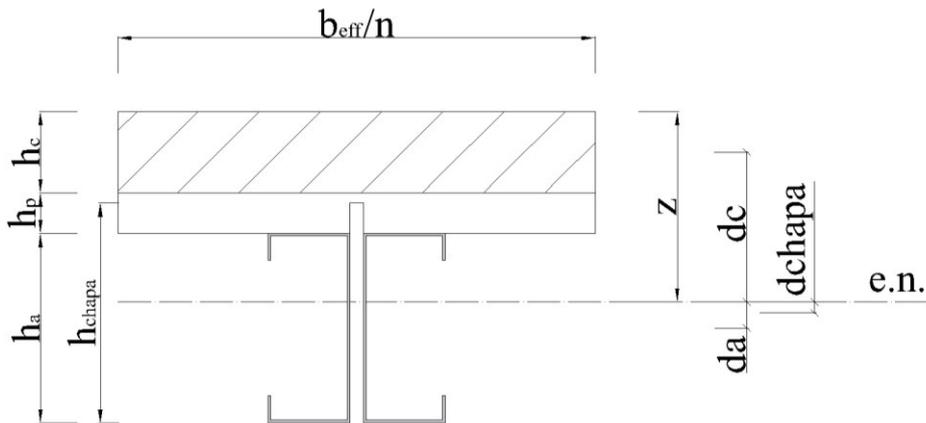


Figura 3.39 - Caso C: eixo neutro no perfil.

No final são apresentadas as tensões e a posição do eixo neutro de acordo com o Caso em que o provete selecionado se insere (ver Figura 3.40).

Posição do eixo neutro	
EN na laje da chapa perfilada	

Verificações das tensões		
σ_a	✓	268,06 MPa
σ_c	✓	21,13 MPa

Figura 3.40 - Apresentação final dos resultados das características elásticas.

3.11 Cálculo da deformação

Para o cálculo da flexa máxima utilizou-se a Equação (3.65), de acordo com Pinheiro, Catoia, Catoia, & Moreira (2010).

$$f = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.65)$$

em que:

- a distância pré-definida entre as duas cargas $P / 2$;
- f deformação máxima da secção efetiva homogeneizada em aço, desprezando o betão tracionado.

Para o cálculo de I_m é necessário conhecer a posição do centro de gravidade, que foi calculado de acordo com a Equação (3.47). Depois de conhecida a posição do e.n., ou seja, caso A, B ou C, tem de se calcular a profundidade do e.n., z , e só depois é que se pode proceder ao cálculo de I_m .

Se estivermos perante o caso A, a profundidade do e.n. é calculada de acordo com a Equação (3.50) e o momento de inércia é calculado de acordo com as Equações (3.51), (3.52), (3.53), (3.54), (3.55) e (3.56). Se estivermos perante o caso B ou C, a profundidade do e.n. é calculada

de acordo com a Equação (3.62) e o momento de inércia é calculado de acordo com as Equações (3.63), (3.52),(3.53), (3.64), (3.55) e (3.56).

No final dos cálculos efetuados, é apresentada a posição do e.n. e a flecha máxima a meio vão (ver Figura 3.41).

Posição do eixo neutro		Flecha máxima	
EN na laje da chapa perfilada		f	7,2911 mm

Figura 3.41 - Apresentação final dos resultados da deformação máxima a meio vão.

3.12 Cálculo do tipo de conexão

3.12.1 Esforço rasante

O esforço rasante verifica-se para conexões não dúcteis, quando a rotura acontece bruscamente e é calculado de acordo com a Equação (3.66).

$$r_{Ed} = V_{Ed}(x) \times \frac{S_c}{I_m} \quad (3.66)$$

em que:

r_{Ed} esforço rasante atuante na secção mista.

No entanto, para o cálculo de S_c e I_m é necessário conhecer a posição do eixo neutro. Assim, inicialmente calculou-se a posição do e.n. de acordo com a Equação (3.47), descrita anteriormente.

Como já foi explicado, podemos ter três situações, caso A, B e C, como descrito de seguida:

- Caso A: se eixo neutro (e.n.) na laje - $y_G > h_a + h_p$;
- Caso B: se eixo neutro (e.n.) na chapa perfilada - $y_G > h_a$;
- Caso C: se eixo neutro (e.n.) no perfil - $y_G \leq h_a$.

Logo, se estivermos perante o caso A as Equações do momento estático de betão e do momento de inércia vão ser as efetuadas anteriormente em (3.48) e em (3.51), (3.52),(3.53), (3.54),(3.55) e (3.56). Em que a profundidade do e.n., z , vai ser calculada de acordo com a Equação (3.50) também já descrita anteriormente.

Se estivermos perante o caso B ou C, as equações para os cálculos da profundidade do eixo neutro e para o momento de inércia são as descritas nas Equações (3.62) e nas Equações (3.63),

(3.52),(3.53), (3.64),(3.55) e (3.56), respetivamente. E o momento estático vai ser calculado com base na Equação (3.60).

O cálculo do esforço transversal atuante depende do tipo de carregamento, mas para a situação de ensaio dos provetes é dado pela Equação descrita em (3.3) como também se pode visualizar na Figura 3.6.

No final aparece o resultado do esforço rasante e da posição do eixo neutro, como se pode verificar na Figura 3.42.

Posição do eixo neutro		Esforço rasante	
EN na laje da chapa perfilada		r	375,39 kN/m

Figura 3.42 - Apresentação final dos resultados do esforço rasante (conexão não dúctil).

3.12.2 Resistência ao corte do conector Indentado

Para o cálculo da resistência do conector de chapa lisa do tipo Indentado utilizou-se as Equações (3.67), (3.68), (3.69),(3.70), (3.71), (3.72) e (3.73).

A Equação (3.68) foi escrita por Veríssimo (2007) e a Equação (3.69) foi desenvolvida por Vieira (2009), à exceção do parâmetro β presente nestas duas equações, que foi uma adaptação para o utilizador adaptar as equações ao caso de estudo pretendido.

Antes de iniciar o cálculo, na folha de introdução dos dados, existe a possibilidade de seleccionar os coeficientes de regressão obtidos no estudo efetuado por Veríssimo (2007), onde $B_1 = 1,96$, $B_2 = 2,72$, $B_3 = 0,07$ e $B_4 = 0,3,57$ kN, ou de seleccionar os coeficientes obtidos por Vieira (2009), onde $B_1 = 3,56$, $B_2 = 0,536$, $B_3 = 1,62$ e $B_4 = 28,76$ N, ou então introduzir esses coeficientes manualmente (ver Tabela AI.5 do Anexo I).

Posteriormente, já na folha referente ao cálculo propriamente dito, procede-se à escolha dos coeficientes de regressão, isto é, se o cálculo vai ser realizado com os coeficientes obtidos automaticamente, por Veríssimo (2007) ou Vieira (2009), de acordo com a escolha efetuada na folha de introdução de dados, ou com os coeficientes inseridos manualmente pelo utilizador. Somente, após se clicar no botão “COEFICIENTE REGRESSÃO AUTOMÁTICO” ou “COEFICIENTE REGRESSÃO MANUAL”, é que o resultado apresentado estará correto e atualizado. Ainda no mesmo contexto e se o utilizador escolher a opção dos coeficientes de regressão automáticos, efetua-se a escolha relativamente à contabilização da primeira parcela das Equações (3.68) e (3.69), isto é, existem dois botões para decidir se a força de compressão na face frontal do conector será multiplicada por zero ou por um ($\beta=0$ ou $\beta=1$), conforme o caso de estudo.

$$q \geq VI \rightarrow OK! \quad (3.67)$$

$$q = B_1 \times \sqrt{\frac{h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a}{h_c + h_p}} \times (h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a) \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \times \beta + \quad (3.68)$$

$$+ B_2 \times n_{aberturas} \times D^2 \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_3 \times A_{cc} \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_4 \times 5 \times 10^6 \times \rho$$

$$q = B_1 \times \sqrt{\frac{h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a}{h_c + h_p}} \times (h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a) \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \times \beta + \quad (3.69)$$

$$+ B_2 \times n_{aberturas} \times h_{ranhuras} \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} +$$

$$+ B_3 \times n_{aberturas} \times A_{aberturas} \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_4 \times 5 \times 10^5 \times \rho$$

onde:

$$A_{cc} = \frac{L}{2} \times (h_{total} - h_{chapa} - h_{ranhuras}) + n_{aberturas} \times \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.70)$$

$$A_{sf} = \frac{n_{barras,transv.}}{2} \times \frac{\pi \cdot (\phi_{transv.})^2}{4} \quad (3.71)$$

Se equação por Veríssimo (2007) $\rightarrow \rho \leq \begin{cases} \left(\frac{A_{sf}}{Acc} \right) \\ 0,01 \end{cases} \quad (3.72)$

Se equação por Vieira (2009) $\rightarrow \rho \leq \begin{cases} \left(\frac{A_{sf}}{Acc} \right) \\ 0,013 \end{cases} \quad (3.73)$

$$VI = \text{mín} \{ N_{cf,tot}; N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot} \} \quad (3.73)$$

em que:

- $A_{aberturas}$ área trapezoidal da abertura do conector (ver Figura 3.43);
- A_{cc} área de corte do betão por conector;
- A_{sf} área da armadura transversal;
- B_1, B_2, B_3 e B_4 coeficientes de regressão;
- D diâmetro das aberturas, entre ranhuras, do conector de chapa lisa do tipo Indentado;
- VI força mínima plástica;
- $h_{ranhuras}$ altura das rasnhuras do conector de chapa lisa do tipo Indentado;
- $n_{aberturas}$ número de aberturas, entre ranhuras, do conector de chapa lisa do tipo Indentado;
- $n_{barras,transv.}$ número de varões transversais;

- q resistência ao corte do conector de chapa lisa do tipo Indentado;
- β parâmetro;
- $\phi_{transv.}$ diâmetro da armadura transversal;
- ρ taxa geométrica da armadura transversal.

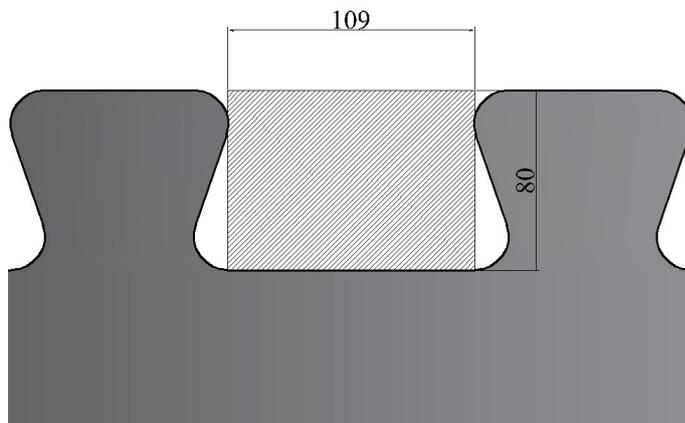


Figura 3.43 – Área considerada para a abertura do conector.

O primeiro termo das Equações (3.68) e (3.69), diz respeito à força de compressão na face frontal do conector, onde a raiz quadrada de $((h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a) / h_{laje})$, está associada ao efeito da excentricidade do conector. O segundo e o terceiro termo remetem para o efeito de corte existente na área da laje de betão incluindo as aberturas do conector Indentado. A última parcela representa o efeito da taxa de armadura.

Na Equação (3.68) o coeficiente de regressão B_4 é multiplicado pela constante 5×10^6 e na Equação (3.69) o coeficiente de regressão B_4 é multiplicado pela constante 5×10^5 , para manter a taxa de armadura na mesma ordem de grandeza dos outros termos das equações, isto é, para contornar problemas de representação numérica.

A taxa de armadura na equação proposta por Veríssimo (2007) e a taxa de armadura na equação proposta por Vieira (2009), está limitada a 1% e a 1,3%, respetivamente, pois valores de ρ superiores a estes não produzem acréscimo significativo no sistema.

No final dos cálculos efetuados serem atualizados, aparece o resultado da resistência de corte do conector de chapa lisa do tipo Indentado, como a Figura 3.44 demonstra.

Resistência ao corte	
q	732,96 kN

Figura 3.44 - Apresentação final dos resultados da resistência ao corte do conector Indentado.

3.12.3 Resistência ao corte do conector Xadrez

Para conhecer a resistência do conector do tipo Xadrez utilizou-se as Equação (3.74), (3.75), (3.76), (3.77), (3.78) e (3.79).

A Equação (3.74), da determinação da tensão tangencial máxima, foi calibrada pelo estudo desenvolvido por Thomann & Lebet (2007). O ensaio realizado nesse estudo consistiu não só na aplicação de uma carga vertical, mas também na aplicação de uma carga horizontal que comprime o provete, resultando assim uma tensão de corte e uma tensão normal (ver Figura 3.45). No caso presente de estudo não existe a aplicação de uma tensão normal, no entanto, essa tensão pode ser vista como uma tensão de confinamento resultante da armadura e do conector embebidos na laje de betão, assemelhando-se deste modo ao sistema misto a estudar.

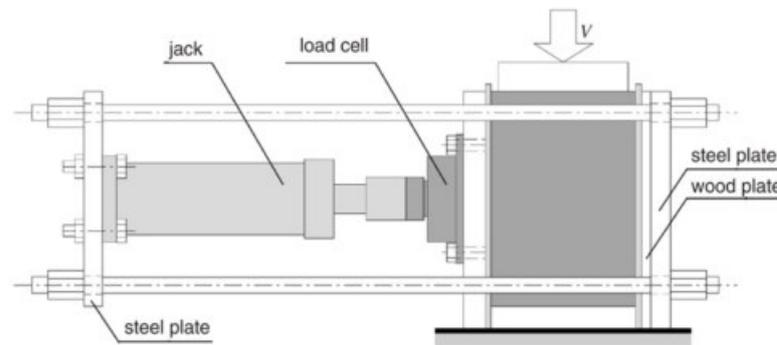


Figura 3.45 – Esquema de ensaio *setup*. (Thomann & Lebet, 2007)

$$\tau_{m\acute{a}x} = \tau_f + \tau_b = \mu \cdot \sigma + \kappa \cdot m \cdot A' \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (3.74)$$

$$g = \tau_{m\acute{a}x} \times A_{chapa,long}. \quad (3.75)$$

$$g \geq VI \rightarrow OK! \quad (3.76)$$

onde:

$$A_{chapa,long.} = 2 \cdot \left(h_{chapa} \times \frac{L}{2} \right) \quad (3.77)$$

$$0,3 < m < 0,6 \quad (3.78)$$

$$\text{Se R1, ent\~{a}o} \rightarrow 0,66 < \kappa < 0,74 \quad (3.79)$$

$$\text{Se R2, ent\~{a}o} \rightarrow 0,73 < \kappa < 0,75$$

em que:

$A_{chapa,long.}$ área longitudinal do conector de chapa do tipo Xadrez;

A', m e κ parâmetros;

R1 e R2 disposição da chapa do tipo Xadrez (ver Figura 3.46);

g resistência ao corte do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez;

μ coeficientes de fricção;

σ	intensidade da tensão normal na interface;
σ_0	tensão normal de referência na interface;
$\tau_{m\acute{a}x}$	tensão tangencial máxima de corte;
τ_f	tensão de corte residual, igual à resistência de atrito ($\mu\sigma$);
τ_b	tensão de corte na rotura (para o modo de rotura por corte).

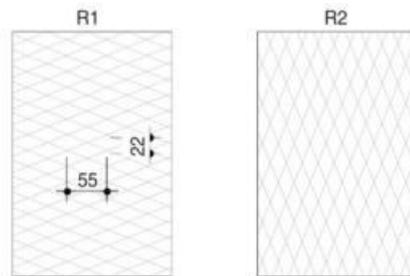


Figura 3.46 – Disposições possíveis para a chapa nervurada do tipo Xadrez. (Thomann & Lebet, 2007)

Na Ferramenta de Cálculo existe a possibilidade do utilizador escolher se as variáveis para o cálculo da tensão tangencial máxima serão automáticas, isto é, se as variáveis serão as obtidas no estudo efetuado por Thomann & Lebet (2007) (ver Tabela AI.6 do Anexo I), ou se serão manuais, isto é, se as variáveis serão as inseridas pelo utilizador. As variáveis obtidas de acordo com Thomann & Lebet (2007) são as seguintes:

- $A' = 0,13$;
- Se nervuras do tipo R1, então $\kappa = 0,66$ e $m = 0,127$;
- Se nervuras do tipo R2, então $\kappa = 0,73$ e $m = 0,051$;
- $\mu = 0,72$;
- $\sigma_0 = 0,7$ MPa.

Também existe ainda a possibilidade do utilizador poder inserir a tensão tangencial máxima manualmente, em que nesse caso a equação desenvolvida por Thomann & Lebet (2007) não será utilizada, e portanto a escolha das variáveis não será necessária.

Após o utilizador inserir os dados necessários para a avaliação da resistência da conexão, na folha correspondente ao cálculo da resistência do conector do tipo Xadrez, o utilizador tem de clicar no botão “TENSÃO TANGENCIAL MÁXIMA EQUAÇÃO” caso pretenda utilizar o $\tau_{m\acute{a}x}$ calculada pela equação desenvolvida por Thomann & Lebet (2007) ou no botão “TENSÃO TANGENCIAL MÁXIMA MANUAL” caso pretenda utilizar o $\tau_{m\acute{a}x}$ inserido manualmente. Se este clicar no botão “TENSÃO TANGENCIAL MÁXIMA EQUAÇÃO” tem ainda que escolher se pretende utilizar no cálculo as variáveis automáticas ou manuais, e nesse caso clicar no botão “VARIÁVEIS AUTOMÁTICAS” ou “VARIÁVEIS MANUAIS”, respetivamente. Só após clicar nos botões referido é que o cálculo é atualizado e o resultado se encontra válido.

Por fim, o resultado da resistência de corte do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, atualizado, é apresentado, como se pode verificar na Figura 3.47.

Resistência ao corte	
g	292,4 kN

Figura 3.47 - Apresentação final dos resultados da resistência ao corte do conector Xadrez.

3.13 Explicação do funcionamento da ferramenta

Através das informações selecionadas na folha de dados, o cálculo processa-se automaticamente, podendo o mesmo validar a capacidade resistente do sistema misto ou não, o que se pode apurar na folha de cálculo caso o resultado se apresente com a cor verde ou vermelha, respetivamente. Com a exceção das características plásticas e da resistência ao corte dos conectores, que como já foi referido, sempre que os dados de entrada são alterados tem de se clicar nos botões, para os resultados serem atualizados, não sendo a atualização automática como nas outras folhas de cálculo. No caso das características plásticas tem de se seleccionar o botão “CALCULAR”. No caso da resistência ao corte do conector Indentado tem de se clicar no botão “COEFICIENTE REGRESSÃO AUTOMÁTICO” ou no botão “COEFICIENTE REGRESSÃO MANUAL” e se o utilizador seleccionar a primeira opção, então terá ainda que clicar nos botões “FORÇA COMPRESSÃO NA FACE FRONTAL DO CONECTOR = 0” ou “FORÇA COMPRESSÃO NA FACE FRONTAL DO CONECTOR = 1”. No caso da resistência ao corte do conector Xadrez tem de se seleccionar o botão “TENSÃO TANGENCIAL MANUAL” ou o botão “TENSÃO TANGENCIAL EQUAÇÃO”, se a escolha for a segunda opção o utilizador terá ainda que seleccionar o botão “VARIÁVEIS AUTOMÁTICAS” ou o botão “VARIÁVEIS MANUAIS”.

Como já foi referido anteriormente, todos os campos a sombreado com a cor laranja são de preenchimento obrigatório e apenas nestes campos é que é possível fazer alterações dos dados. Os campos a verde são os valores finais que nos interessam para análise, estes podem mudar de cor para vermelho caso a viga não possua as condições necessárias para garantir a resistência à flexão, caso as tensões limite no aço e no betão sejam ultrapassadas e caso os conectores, Indentado ou Xadrez, não possuam a resistência ao corte necessária. Se as células estiverem com cor verde aparece uma confirmação através de uma seta verde, se estiverem com a cor vermelho aparece um “x” vermelho e a cor da letra muda para vermelho e negrito para chamar a atenção de que algo está incorreto. Os campos com cor verde sem qualquer tipo de seta, significam que não necessitam de verificar nenhuma condição, apenas representam o resultado final.

Os campos com sombreado laranja claro são chamadas de atenção para uma melhor compreensão, se algo não estiver bem, nesses campos aparece uma informação sobre a ocorrência com a cor de letra laranja.

Nos campos a branco não se fazem alterações, alguns podem mudar de cor para um sombreado vermelho e letra vermelha e a negrito caso algo esteja incorreto, isto significa que teremos que proceder a alteração nos dados introdutórios ou nos dados gerais. Apesar do erro ser apresentado naquele campo não podemos fazer as alterações nesse mesmo campo, teremos sempre que ir às tabelas dos dados gerais e/ou dos dados introdutórios, ou seja, faz-se as alterações sempre nos campos a laranja.

Na Tabela 3.3 apresenta-se resumidamente o significado de cada cor sombreada nas células da folha de cálculo e na Tabela 3.4 apresenta-se de forma esquemática o funcionamento e significado das várias cores, sombreados e tipos de letra da ferramenta de cálculo, sendo que alguns apenas representam as chamadas de atenção, outros onde se deve proceder aos preenchimentos dos campos e outros os resultados.

Ainda para permitir um manuseamento mais fácil e rápido da ferramenta foram criadas macros que permitem passar diretamente de umas folhas para as outras. Sendo assim, para passar de determinada folha para a folha dos dados das vigas mistas enformadas a frio basta selecionar as teclas “Ctrl” + ”F” em simultâneo, para passar para a folha de cálculo das características plásticas clica-se em “Ctrl” + ”P” em simultâneo, para a passar para a folha de cálculo das caraterísticas elásticas seleciona-se em simultâneo as teclas “Ctrl” + ”E”, para passar para a folha de cálculo que diz respeito à deformação máxima a meio vão basta clicar em simultâneo nas teclas “Ctrl” + ”D” e para passar para a folha com os cálculos da conexão seleciona-se as teclas “Ctrl” + ”L” em simultâneo.

Tabela 3.3 - Legenda de cores da Ferramenta de Cálculo

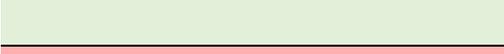
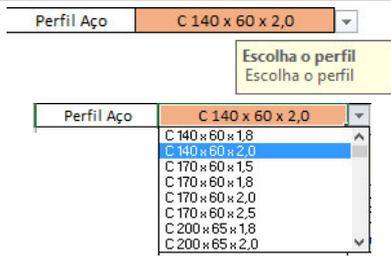
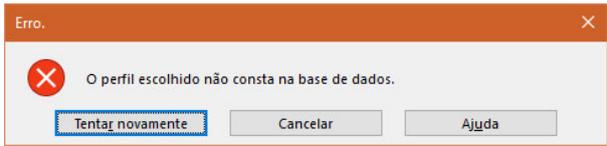
Cores	Significado
	Introduzir informação/dados
	Chamada de atenção/informação
	Resultado da análise
	Não cumpre alguma condição/valor incorreto

Tabela 3.4 - Explicação esquemática do funcionamento da Ferramenta de Cálculo

Designação	Esquema/Exemplificação						
Selecionar a informação de uma lista pré-definida							
Escrever manualmente o valor pretendido	<table border="1"> <tr> <td>b_{eff}</td> <td>350 mm</td> </tr> <tr> <td>h_c</td> <td>60 mm</td> </tr> </table>	b _{eff}	350 mm	h _c	60 mm		
b _{eff}	350 mm						
h _c	60 mm						
Chamadas de atenção	<p>EN na laje</p> <p>OK!</p>						
Não respeita determinada condição/restricção	<table border="1"> <tr> <td>Mpl,Rd</td> <td>✖</td> <td>54,95 kN.m</td> </tr> </table>	Mpl,Rd	✖	54,95 kN.m			
Mpl,Rd	✖	54,95 kN.m					
Respeita a condição/restricção	<table border="1"> <tr> <td>σ_a</td> <td>✔</td> <td>273,58 MPa</td> </tr> <tr> <td>σ_c</td> <td>✔</td> <td>15,82 MPa</td> </tr> </table>	σ _a	✔	273,58 MPa	σ _c	✔	15,82 MPa
σ _a	✔	273,58 MPa					
σ _c	✔	15,82 MPa					
Resultado final que se pretende analisar	<table border="1"> <tr> <td>f</td> <td>16,68704282 mm</td> </tr> </table>	f	16,68704282 mm				
f	16,68704282 mm						
Impedimento de escolha de determinada informação que não consta na base de dados (listas pré-definidas) ou que não respeita alguma restrição imposta pelo EC4							
Informação para ajudar no preenchimento da célula	<p>Escolha a classe de betão Escolha a classe de betão</p>						
Selecionar o botão para atualizar os resultados	<p>Calcular</p> <p>Tensão Tangencial Máxima Equação</p>						

Em Anexo (Anexo II) são apresentadas as tabelas das folhas de cálculo, com o objetivo de dar melhor a conhecer a Ferramenta de Cálculo. Estas tabelas são referentes aos dados de saída, pois os dados de entrada já foram apresentados anteriormente.

3.14 Validação da Ferramenta de Cálculo

Após a fase de programação, foi necessário comprovar se os resultados obtidos estavam corretos. Posto isto, houve o cuidado de verificar os cálculos do Excel de duas formas: manualmente e informaticamente., alterando os dados sucessivamente, de modo a averiguar se os resultados eram adequados.

3.14.1 Validação manual

Para a confirmação do correto funcionamento da Ferramenta de Cálculo foi necessário introduzir os dados de entrada. Estes dados de entrada foram sofrendo pequenas variações na altura da chapa do conector, de modo a que todas as hipóteses de cálculo fossem verificadas.

Assim, foi possível a comparação dos resultados obtidos na ferramenta com os resultados calculados manualmente, confirmando-se desta forma o funcionamento correto da ferramenta.

Os dados que foram utilizados inicialmente estão patentes na Figura 3.48 e na Figura 3.49.

As equações e o procedimento realizado para validação da Ferramenta de Cálculo, encontram-se no Anexo III.

Dados introdutórios		
P	143	kN
L	2172,1	mm
a	786,05	mm
b	600	mm

(a)

Esforços atuantes	
MEd	56,20 kN.m
VEd	71,50 kN

(b)

Figura 3.48 - Dados selecionados para a validação da ferramenta desenvolvida. (a) Dados da carga e do vão; (b) Esforços atuantes, para a carga e vão impostos.

Dados Gerais			
Chapa perfilada de aço		Unidades	
Chapa Aço	1PC 60 x 820 x 1,0		
Catálogo	O FELIZ		
Material	S320 GD + Z		
Disposição	Chapa transversal à viga		
Classe de aço	S320GD+Z		
fy	320	MPa	
hp	60	mm	
bp	820	mm	
ap	205	mm	
c	145	mm	
f	60	mm	
n	100	mm	
m	105	mm	
t	1	mm	
Perfil de aço		Unidades	
Perfil Aço	C 140 x 60 x 2,0		
Catálogo	O FELIZ		
Material	-		
Classe de aço	S280GD+Z		
fy	280	MPa	
ha	140	mm	
b	60	mm	
a	20	mm	
t	2	mm	
Área	584	mm ²	
Iy	1813987	mm ⁴	
Ea	210	GPa	
Ya	1		
Chapa Conector		Unidades	
hchapa	220	mm	
echapa	5	mm	
Achapa	1100	mm ²	
fychapa	220	MPa	
Ychapa	1		
Alturas consideradas		Unidades	
htotal,laje (hp + hc)	120	mm	
htotal (ha + hp + hc)	260	mm	
ha + hp	200	mm	
Relação vão/altura			
vão/htotal	9,01		
Armadura (malha sol)		Unidades	
φ transversal	φ8		
		8	mm
esp. transversal	100		mm
nbarra,transv.		23	
φ longitudinal	φ6,5		6,5
			mm
esp. longitudinal	150		150
			mm
nbarra,longit.		16	
Betão		Unidades	
Classe de betão	C25/30		
beff	350	mm	
hc	60	mm	
Ac	21000	mm ²	
fck	25	MPa	
Ec = Ecm	31,5	GPa	
Yc	1		
Conexão - Xadrez		Unidades	
<i>Variáveis automáticas</i>			
Autor	Thomann M., Lebet J. P.		
Disposição	R2		
μ		0,72	
A'		0,13	
σ0		0,7	MPa
m		0,051	0,3 < m < 0,6
κ		0,73	0,73 < κ < 0,75
<i>Variáveis manuais</i>			
μ		0,7	
A'		0,13	
σ		0,5	MPa
σ0		0,7	MPa
m		0,05	
κ		0,7	
<i>Tensão tangencial máxima - manual</i>			
τmáx		3	MPa
Conexão - Indentado		Unidades	
<i>Coefficiente de regressão automático</i>			
Autor	Veríssimo G. S.		
B1		1,96	
B2		2,72	
B3		0,07	
B4		3,57	
<i>Coefficiente de regressão manual</i>			
B1		2	
B2		2	
B3		0,2	
B4		1	
naberturas		6	
hranhura		80	mm
D		80	mm
Acc		-16682,71	mm ²
Asf		578,05	mm ²
Aaberturas		8720,00	mm ²
p		-0,035	mm ²
Coeficiente de homogeneização			
n		6,666666667	

Figura 3.49 - Dados gerais escolhidos, para a validação da ferramenta desenvolvida.

3.14.2 Validação informática/automática

Para uma confirmação dos resultados obtidos pela Ferramenta de Cálculo, efetuou-se uma segunda validação que consistiu em alterar sucessivamente os dados de entrada e verificar os correspondentes resultados. A variação imposta aos parâmetros de entrada teve como objetivo “forçar” a mudança de posição do eixo neutro.

Previamente, analisou-se o valor das forças plásticas, impondo a variação da altura da chapa.

Posteriormente analisou-se também as várias hipóteses de cálculo existentes, tanto para o cálculo plástico como para o cálculo elástico. Alterou-se a altura da chapa do conector e, de acordo com os resultados obtidos nas respetivas folhas de cálculo verificou-se se o provete se enquadrava no caso correto. Para tal, a profundidade do eixo neutro era sempre verificada, sendo esta a referência para a correta validação.

Também se alterou a largura da laje maciça de betão, de modo a que o eixo neutro fosse descendo até ao perfil. Esta largura foi sofrendo pequenas variações de forma a abranger todas as hipóteses de cálculo. À medida que o eixo neutro descia, verificaram-se as zonas de transição, como por exemplo, a transição da laje maciça de betão para a chapa perfilada. Para tal, verificava-se sempre o valor da profundidade do eixo neutro (z), averiguando se este valor corresponde à hipótese de cálculo em questão.

Este tipo de validação permitiu testar todas as hipóteses de cálculo de um modo mais detalhado do que a validação manual, pois não só se alterou a altura da chapa do conector, como também se alterou a largura da laje de betão, o que permitiu que cada um dos modelos testados se enquadrasse numa das hipóteses de cálculo assumidas, e globalmente, todas essas hipóteses fossem testadas.

3.15 Estudo paramétrico

A ferramenta desenvolvida pretende facilitar o processo de dimensionamento. Apesar disso, todos os dados são introduzidos pelo utilizador, pelo que este tem de possuir a sensibilidade necessária para fazer a escolha da solução mais viável e económica.

3.15.1 Modelo base

Posteriormente à construção da ferramenta de cálculo prosseguiu-se com determinação do modelo base. A seleção deste modelo resulta de um conjunto de pressupostos que serão detalhados nesta secção. Assim sendo, as exigências e/ou pressupostos que orientaram a definição do modelo base são as/os seguintes:

- O comprimento total do provete foi definido tendo em consideração a largura dos painéis de chapa perfilada, por forma a manter o comprimento das chapas sem obrigar ao corte das mesmas;
- A distância pré-definida entre as duas cargas $P/2$, é de 600 mm, valor este que resulta das dimensões do distribuidor de carga de que laboratório dispõe;
- O carregamento, P , deve estar entre 0 e 500 kN;
- A localização do eixo neutro posiciona-se aproximadamente na zona de transição entre a laje de betão e a chapa perfilada, para que não existam instabilidades no perfil “C”;
- O comprimento do vão deve estar entre 2,0 m e os 3,0 m, para maximizar o esforço rasante na ligação entre os dois materiais;
- O betão deve possuir as características utilizadas normalmente em obra e, portanto, a classe de betão deverá estar entre um C20/25 e um C30/37;
- Adição de chapas sob os apoios e colocação de nervuras na secção transversal do perfil “C”, alinhadas sobre os apoios. As chapas de base são adicionadas para o perfil ficar

bem posicionado sobre os apoios, conferindo-lhe estabilidade e as nervuras laterais colocadas no perfil “C” asseguram a transmissão do esforço de corte, na sua totalidade, da laje para os apoios, impedindo a viga de sofrer instabilidade local durante o ensaio.

Além destas exigências referidas, a solução tem ainda que respeitar as restrições e condições introduzidas na ferramenta de cálculo, que já foram explicadas anteriormente e tem que ter em conta as dimensões máximas que poderão ser reproduzidas em laboratório, bem como a carga máxima que pode ser aplicada com o equipamento disponível no laboratório.

A chapa perfilada e o perfil “C” selecionados para este estudo são produzidos na empresa O FELIZ, e portanto estes elementos estão limitados ao catálogo da empresa.

A Figura 3.50 mostra que a chapa perfilada selecionada, da empresa OFELIZ, tem 820 mm de comprimento. É necessário ter em atenção a sobreposição de chapas, resultando num comprimento total de 2512,1 mm, tal como representado na Figura 3.50.

Para que a solução cumpra a exigência do vão (2 m – 3 m) o número máximo de chapas a utilizar são três, perfazendo um comprimento total de 2512,1 mm. No entanto, com a consideração das zonas de entrega nos apoios, que possuem uma dimensão de 170 mm × 200 mm, o vão vai diminuir, ficando assim o provete com um vão de 2342,1 mm ($2512,1 - 170/2 - 170/2$).

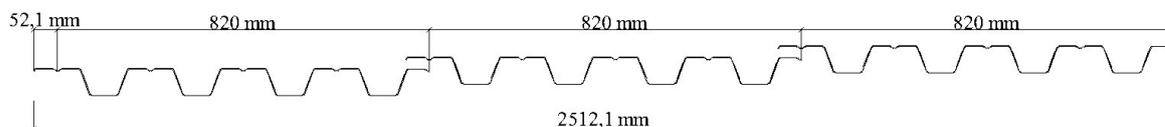


Figura 3.50 - Encaixe da chapa perfilada.

De acordo com os pressupostos enunciados, prosseguiu-se à escolha do perfil “C”, da chapa perfilada, da chapa do conector e do betão. Para encontrar a solução mais adequada, realizaram-se várias iterações até que todos os pressupostos fossem cumpridos. Essas iterações basearam-se em repetitivas alterações dos valores do perfil “C”, da classe de aço, da chapa perfilada, da chapa do conector, da classe de betão, dos valores de b_{eff} e h_c .

Inicialmente selecionou-se um Perfil “C” da empresa O FELIZ. De seguida selecionou-se a classe de aço do perfil, sendo esta uma classe corrente (S280 GD+Z).

A chapa perfilada foi escolhida considerando as soluções mais correntes do mercado.

A classe de aço da chapa do conector também teve em consideração a disponibilidade do mercado, sendo neste caso um S220 GD +Z.

Realizaram-se algumas iterações entre as classes de betão mais correntes. A estas iterações juntaram-se também iterações da largura e da altura da laje de betão. Começando pela classe de betão corrente mais baixa, C20/25, fez-se variar a largura da laje entre os valores de 200 e 500 mm e a altura da laje de betão entre os 20 mm e um máximo de 60 mm.

Em simultâneo, procedeu-se à alteração sucessiva do carregamento, de modo a cumprir as verificações de segurança.

Na Figura 3.51 é possível visualizar os valores adotados para os vários elementos que compõem a viga mista e na Figura 3.52 é possível visualizar os valores de vão e carregamento associados à solução escolhida como modelo base.

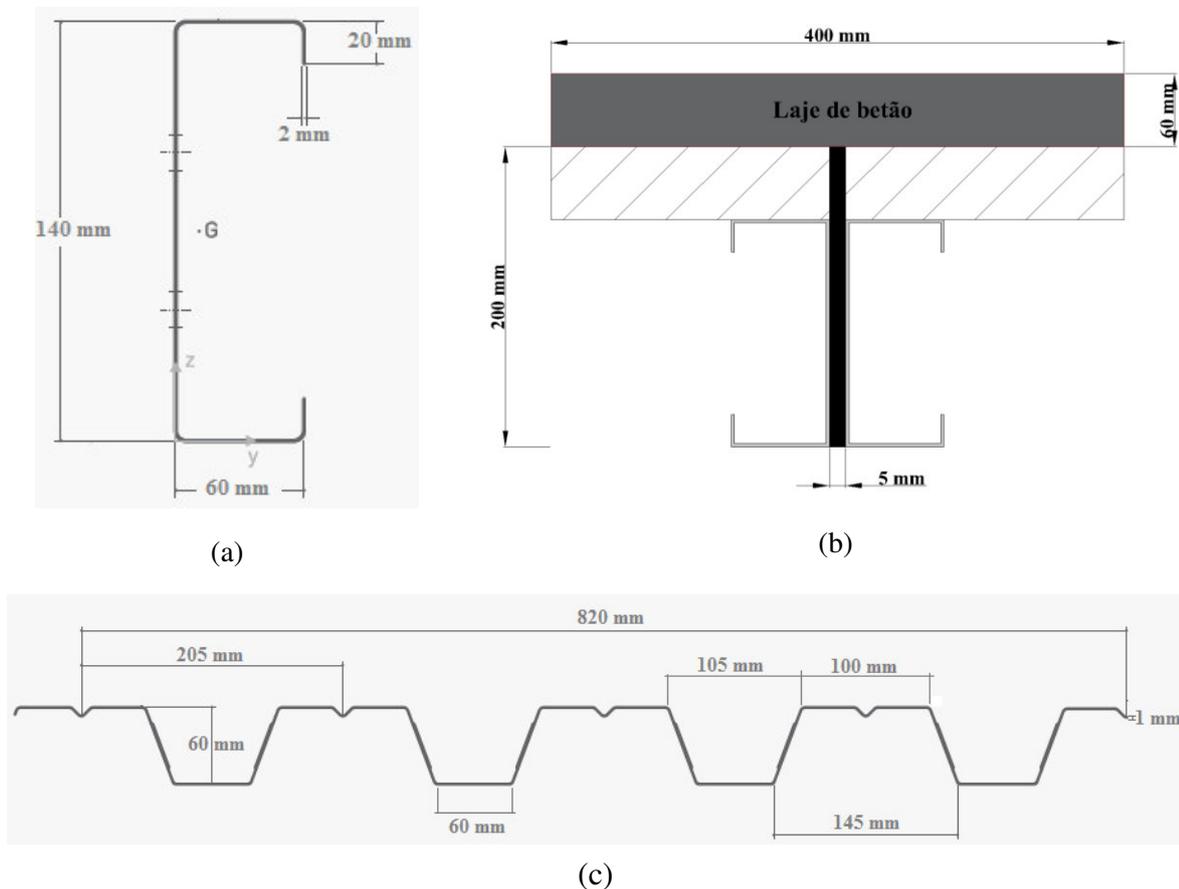


Figura 3.51 - a) Solução adotada do modelo base para o perfil de secção em "C"; b) Solução adotada do modelo base para a laje de betão e para a chapa do conector; c) Solução adotada do modelo base para a chapa perfilada.

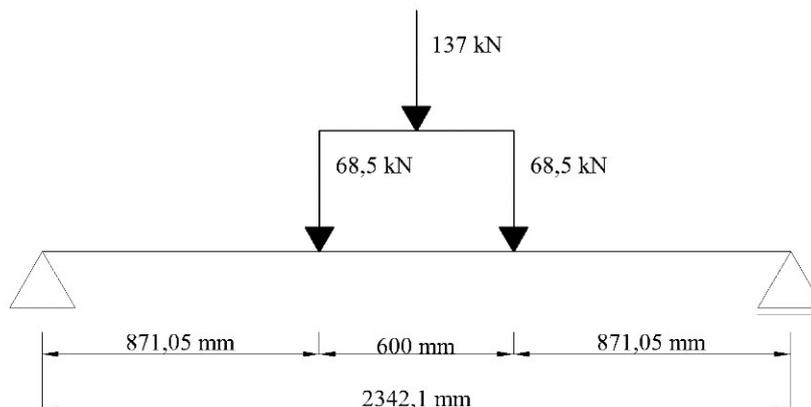


Figura 3.52 - Solução de vão e carregamento adotada para o modelo base.

Tal como pretendido, na solução adotada, o eixo neutro situa-se na laje, ao nível da chapa perfilada e, portanto, os resultados obtidos foram os que se seguem.

Cálculo plástico

A profundidade do eixo neutro possui um valor de 76,84 mm e o momento plástico resistente possui um valor de 79,50 kN.m logo, $M_{pl,Rd} = 79,50 \text{ kN.m} \geq M_{Ed} = 59,67 \text{ kN.m}$. Assim, a solução consegue assegurar a resistência ao esforço a que vai estar sujeita.

Na Figura 3.53, retirada da ferramenta de cálculo, pode-se visualizar este resultado.

Momento plástico resistente		
$M_{pl,Rd}$	✓	79,50 kN.m

Posição do eixo neutro		
z	76,84 mm	EN na chapa perfilada da laje

Figura 3.53 - Momento plástico resistente e profundidade do eixo neutro calculado pela ferramenta desenvolvida para o modelo base.

Cálculo elástico

As tensões máximas no betão e no aço apresentam os seguintes valores: $\sigma_a = 279,04 \text{ MPa} < 280 \text{ MPa}$ e $\sigma_c = 20,31 \text{ MPa} < 20,33 \text{ MPa}$, assim a solução vai resistir às tensões máximas atuantes nas fibras inferiores do perfil de aço e nas fibras superiores da laje de betão (ver Figura 3.54).

Verificações das tensões		
σ_a	✓	279,04 MPa
σ_c	✓	20,31 MPa

Figura 3.54 - Verificação das tensões do aço e do betão calculadas na ferramenta desenvolvida para o modelo base.

A flecha máxima a que a solução vai estar sujeita possui um valor de 4,24 mm.

O esforço rasante possui um valor máximo de 361,91 kN/m.

3.15.2 Modelos desenvolvidos a partir de alterações no Modelo Base

Esta análise tem como objetivos a avaliação da influência que os vários parâmetros têm na capacidade resistente da secção transversal, conhecer os modelos com maior capacidade resistente, perceber como é que as tensões máximas no aço e no betão, a deformação e o esforço

rasante variam consoante as variações geométricas impostas. Também tem como função permitir seleccionar os modelos para modelação numérica.

Os modelos desenvolvidos resumem-se na Tabela 3.5, onde se podem verificar os parâmetros geométricos que foram alterados em relação ao modelo base, bem como a tensão de cedência do aço dos perfis com secção em “C”. As condições de vão e carregamento aplicados mantêm-se sempre iguais às do modelo base. Nessa tabela, os valores a sombreado representam os valores alterados em relação ao modelo base.

As tensões de cedência utilizadas nas variações são de 220 MPa e 235 MPa, por questões de disponibilidade de mercado. O conector de tipo Xadrez só estava disponível no material S235 e a chapa de aço enformado a frio para fabricação do conector Indentado só estava disponível no material S220GD+Z.

Os modelos com 12 mm de espessura da chapa do conector, representam a opção por um conector de chapa nervurada do tipo Xadrez. Escolheu-se esse valor pois os catálogos das chapas Xadrez têm como espessuras disponíveis 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, e 8 mm e neste caso a chapa Xadrez seleccionada possuirá 6 mm de espessura. De modo a que as ranhuras da chapa Xadrez fiquem em contacto com o betão, esta chapa terá de ser dupla, costas com costas, perfazendo assim uma espessura total de 12 mm. (J. Soares Correia, n.d.)

Na tentativa de realizar um modelo que não possuísse uma chapa perfilada, ou seja, um modelo em que a laje é apenas laje de betão maciça, resultaram os Modelos T, U, V W e X. Nestes modelos, alterou-se as alturas da chapa perfilada e da laje de betão, com o intuito destes ficarem o mais próximo possível de um modelo de laje maciça. Para tal, as dimensões adotadas para a espessura da chapa perfilada foi de 1 mm e para a altura da laje de betão foi de 119 mm, perfazendo um total de 120 mm de altura total da laje.

Tabela 3.5 – Dados geométricos dos vários modelos considerados.

	b_{laje} (mm)	h_{laje} (mm)	Perfil C	f_y (MPa)	h_c (mm)	h_p (mm)	h_{chapa} (mm)	e_{chapa} (mm)
Modelo Base	400	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	200	5
Modelo A	350	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	200	5
Modelo B	450	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	200	5
Modelo C	400	110	C140 × 60 × 2	220	50	60	200	5
Modelo D	400	100	C140 × 60 × 2	220	40	60	200	5
Modelo E	400	120	C240 × 65 × 2	220	60	60	200	5
Modelo F	400	120	C240 × 65 × 1,8	220	60	60	200	5
Modelo G	400	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	140	5
Modelo H	400	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	220	5
Modelo I	400	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	140	12
Modelo J	400	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	220	12
Modelo K	350	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	140	5
Modelo L	350	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	140	12
Modelo M	350	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	220	5
Modelo N	350	120	C140 × 60 × 2	220	60	60	220	12
Modelo O	400	120	C140 × 60 × 2	235	60	60	200	5
Modelo P	350	120	C140 × 60 × 2	235	60	60	140	5
Modelo Q	350	120	C140 × 60 × 2	235	60	60	140	12
Modelo R	350	120	C140 × 60 × 2	235	60	60	220	5
Modelo S	350	120	C140 × 60 × 2	235	60	60	220	12
Modelo T	400	120	C140 × 60 × 2	235	119	1	200	5
Modelo U	350	120	C140 × 60 × 2	235	119	1	140	5
Modelo V	350	120	C140 × 60 × 2	235	119	1	140	12
Modelo W	350	120	C140 × 60 × 2	235	119	1	220	5
Modelo X	350	120	C140 × 60 × 2	235	119	1	220	12

Na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7 são apresentados os resultados obtidos na ferramenta desenvolvida, para os vários modelos considerados nesta análise paramétrica.

Na Tabela 3.6 os resultados a sombreado representam as tensões que ultrapassaram as tensões limite para o aço e para o betão. Os modelos, que por ultrapassarem essas tensões, são novamente analisados, mas com um carregamento diferente daquele que foi considerado no modelo base, ou seja, com um carregamento inferior (de valor P2). Os modelos com a carga P2 que não ultrapassaram essas tensões, são novamente analisados porque as suas tensões ficaram

muito aquém das tensões limite, isto é, por ainda conseguirem suportar uma maior capacidade de carga. Neste caso, a carga máxima aplicada é superior à carga do modelo base.

Tabela 3.6 - Resultados principais obtidos nos vários modelos considerados.

Modelo ^s			P1 = 137 kN				P2 (variável, depende do modelo)				
	z (mm)	M _{pl,Rd} (kN.m)	σ _a (MPa)	σ _c (MPa)	f _{max} (mm)	Γ _{max} (kN/m)	P2 (kN)	σ _a (MPa)	σ _c (MPa)	f _{max} (mm)	Γ _{max} (kN/m)
Base	76,84	79,50	279,04	20,31	4,24	361,91					
A	105,81	75,59	283,82	22,38	4,44	358,89	130	269,32	21,24	4,21	340,55
B	57,21	81,69	275,13	18,66	4,09	364,12					
C	105,47	71,76	298,40	22,74	4,79	367,11	128	278,79	21,24	4,48	342,99
D	101,08	60,45	320,96	26,22	5,50	367,81	111	260,05	21,24	4,46	298,01
E	125,27	122,57	158,55	12,11	1,77	251,19	240	277,26	21,21	3,10	440,03
F	121,59	118,87	167,27	12,29	1,84	252,24	229	279,60	20,54	3,08	422,46
G	56,59	77,79	280,22	20,29	4,46	361,03	136	278,17	20,15	4,22	358,39
H	67,80	79,90	279,07	20,10	4,23	356,81					
I	126,27	89,87	197,41	18,71	3,30	361,88	155	223,34	21,17	3,73	409,42
J	116,31	102,62	197,17	17,89	3,24	341,99	162	233,15	21,15	3,83	404,40
K	120,50	72,73	284,58	22,43	4,45	359,64	129	267,96	21,12	4,19	338,64
L	132,80	83,36	201,51	20,80	3,48	359,44	139	204,45	21,10	3,53	364,59
M	96,78	76,57	283,79	22,10	4,42	352,94	131	271,37	21,13	4,22	337,48
N	120,61	95,57	201,47	19,63	3,40	334,63	148	217,65	21,21	3,68	361,50
O	82,14	80,74	279,04	20,31	4,24	361,91					
P	120,65	73,13	284,58	22,43	4,45	359,64	129	267,96	21,12	4,19	338,64
Q	134,84	84,76	201,51	20,80	3,48	359,44	139	204,45	21,10	3,53	364,59
R	100,18	77,68	283,79	22,10	4,42	352,94	131	271,37	21,13	4,22	337,48
S	120,76	97,58	201,47	19,63	3,40	334,63	148	217,65	21,21	3,68	361,50
T	64,84	81,17	281,21	19,55	4,22	369,92	136	279,16	19,41	4,18	366,93
U	66,09	77,15	287,51	21,32	4,40	368,49	133	279,11	20,70	4,27	357,74
V	97,05	102,12	204,37	18,92	3,39	377,26	153	228,24	21,13	3,78	421,32
W	69,75	79,09	286,29	21,10	4,37	363,17	133	277,93	20,49	4,25	352,57
X	90,69	106,52	203,40	18,21	3,33	355,48	159	236,06	21,13	3,86	412,57

Tabela 3.7 – Posição do eixo neutro plástico e elástico para os vários modelos considerados.

	e. n. plástico	e.n. elástico
Modelo Base	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo A	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo B	laje de betão	chapa perfilada da laje
Modelo C	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo D	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo E	abas superiores dos perfis “C”	perfis “C”
Modelo F	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo G	laje de betão	chapa perfilada da laje
Modelo H	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo I	abas superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo J	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo K	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo L	abas superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo M	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo N	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo O	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo P	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo Q	abas superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo R	chapa perfilada da laje	chapa perfilada da laje
Modelo S	banzos superiores dos perfis “C”	chapa perfilada da laje
Modelo T	laje de betão e intercetando o conector	laje de betão
Modelo U	laje de betão	laje de betão
Modelo V	laje de betão	laje de betão
Modelo W	laje de betão e intercetando o conector	laje de betão
Modelo X	laje de betão e intercetando o conector	laje de betão

Através dos resultados obtidos na ferramenta desenvolvida, é possível constatar que existe uma evolução do momento plástico resistente em função do aumento da largura e/ou espessura da laje de betão (ver Figura 3.55 e ver Figura 3.56), da geometria e/ou tensão de cedência do perfil “C” (ver Figura 3.57) e da altura e/ou espessura da chapa do conector (ver Figura 3.58). Com a evolução do momento plástico resistente a deformação máxima a meio vão vai diminuindo.

O momento plástico resistente em todos os modelos analisados é sempre superior ao momento atuante, tanto para a carga P1 e P2 considerada.

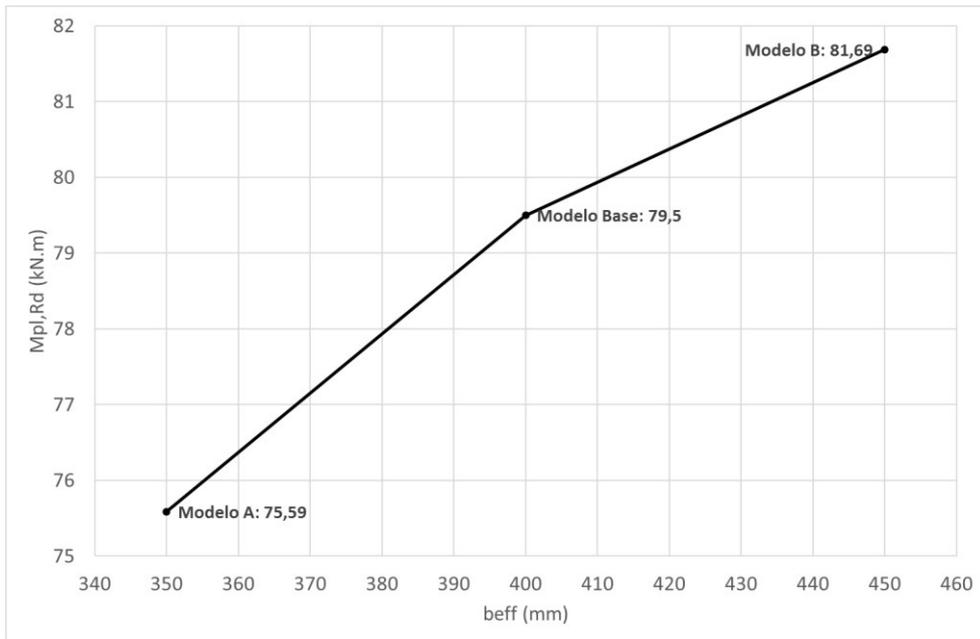


Figura 3.55 – Evolução do momento plástico resistente em função da largura da laje.

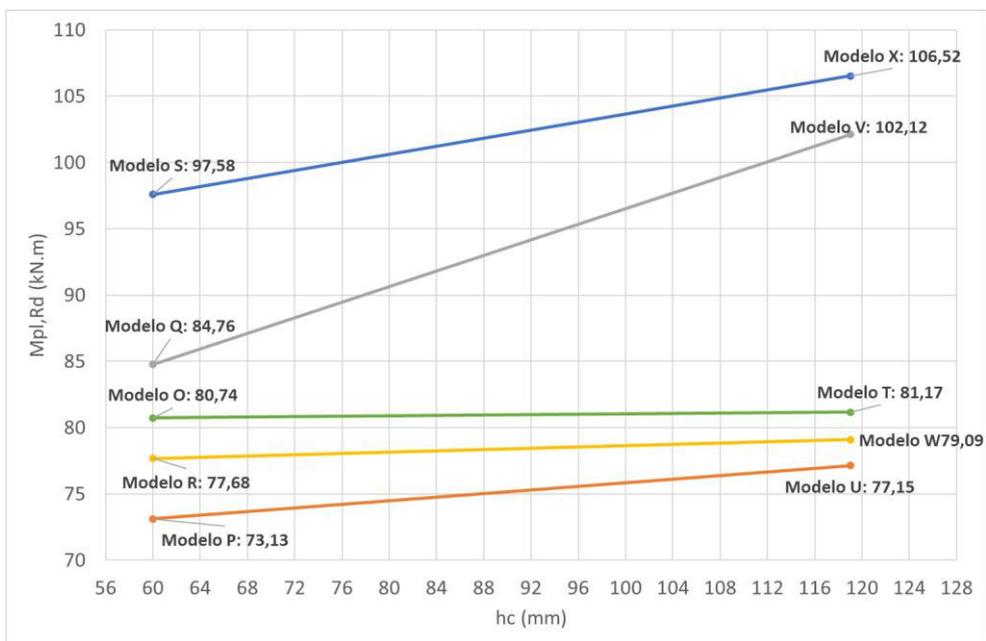


Figura 3.56 - Evolução do momento plástico resistente em função da espessura da laje.

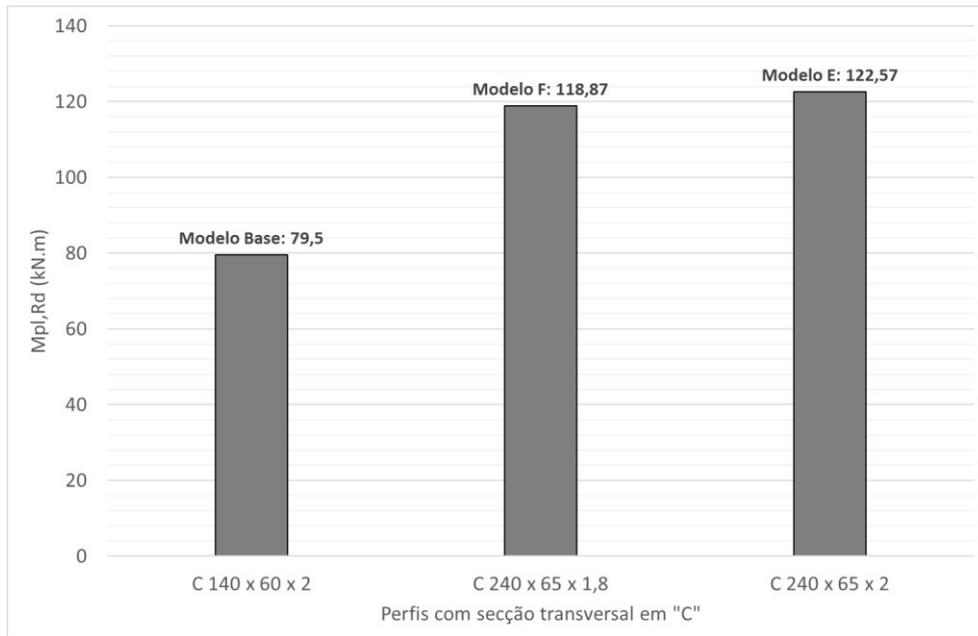


Figura 3.57 - Evolução do momento plástico resistente em função da geomtria dos perfis “C”.

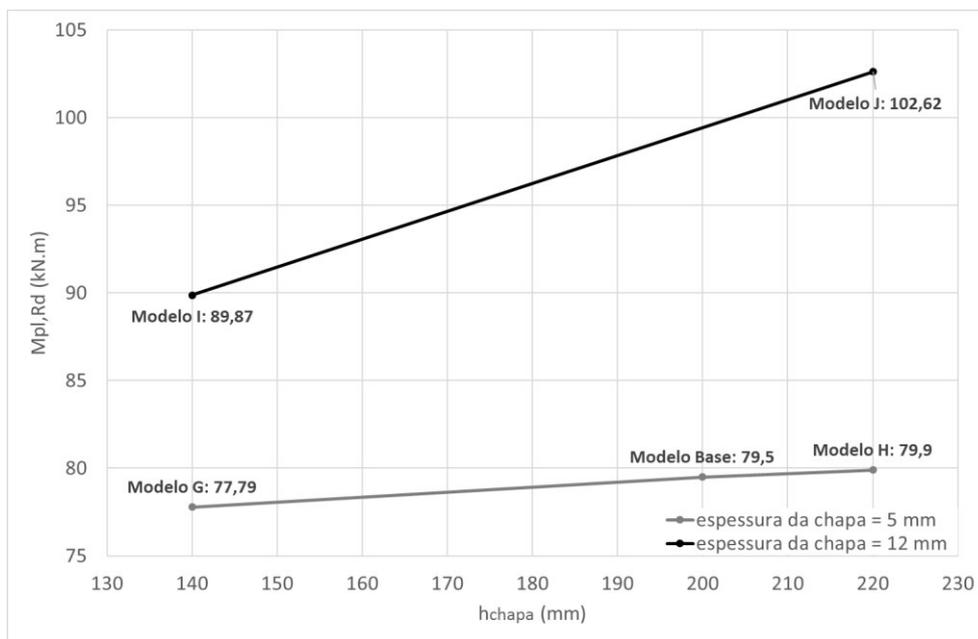


Figura 3.58 - Evolução do momento plástico resistente em função da altura da chapa do conector.

A profundidade do eixo neutro diminui com o aumento da largura e/ou espessura da laje de betão e com a diminuição da geometria e/ou tensão de cedência do perfil “C” e da espessura do conector.

Os modelos que possuem na sua constituição uma laje maciça, apresentam um momento plástico resistente superior e uma profundidade do eixo neutro inferior, aos modelos com laje nervurada.

As tensões máximas no aço diminuem consoante o aumento dimensões do perfil “C” e da espessura do conector e com a diminuição da espessura da laje de betão. As tensões máximas

no betão diminuem com aumento da largura e/ou espessura da laje de betão, das dimensões do perfil “C” e da espessura da chapa do conector.

O esforço rasante diminui com a diminuição da largura e/ou espessura da laje de betão e com o aumento da geometria do perfil “C”.

À medida que se diminui a altura total da laje (h_c+h_p), o momento plástico resistente diminui (ver Figura 3.59), as tensões máximas no aço e no betão aumentam e o esforço rasante também aumenta.

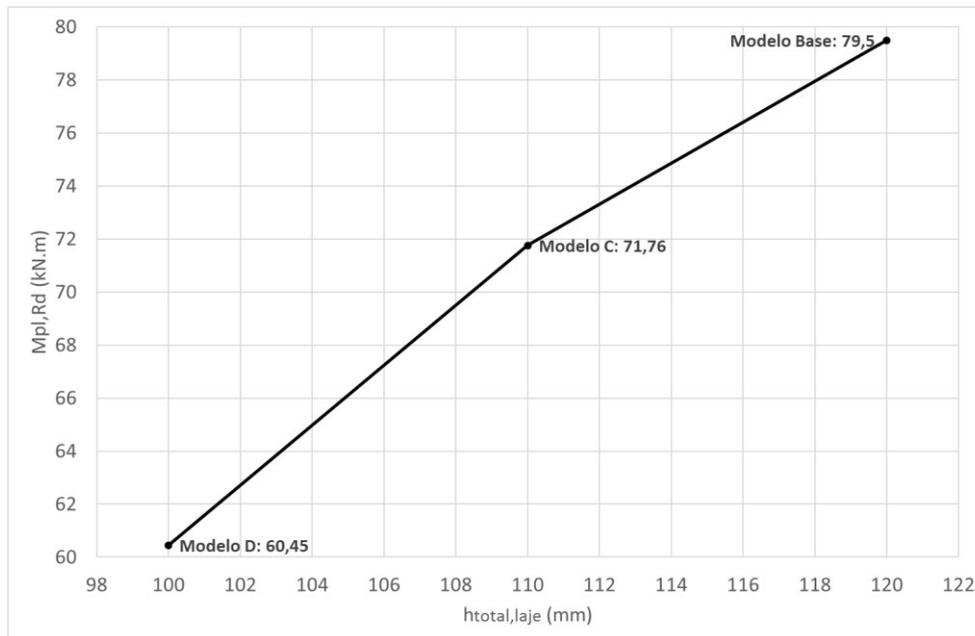


Figura 3.59 - Evolução do momento plástico resistente em função da altura total da laje.

Os modelos com laje nervurada com maior capacidade resistente são os Modelos E e F, devido ao perfil “C” utilizado possuir dimensões superiores aos dos restantes modelos, os Modelos I, J e N, devido á dimensão da chapa do conector elevada e o Modelo S, devido á dimensão da chapa do conector elevada e à maior tensão de cedência do perfil “C”.

Os modelos com laje maciça com maior capacidade resistente são os Modelos V e X, por a chapa do conector possui maior espessura do que os restantes modelos.

Seleção dos modelos para a análise numérica

Os modelos seleccionados para a posterior análise numérica são os Modelos K e S com laje nervurada e os Modelos U e X com laje maciça. A seleção destes modelo teve em conta os aspetos referidos de seguida.

O conector do tipo Xadrez terá uma espessura total de 12 mm, devido à disponibilidade do mercado, e uma altura de 220 mm, pois quanto maior for a sua altura mais resistente será o sistema misto. A tensão de cedência para este conector será de 235 MPa, também devido à

disponibilidade do mercado. Logo o modelo com laje nervurada com maior capacidade resistente para estas características de chapa do conector é o Modelo S.

A escolha do Modelo S restringe a escolha dos restantes modelos para uma largura de laje de 350 mm.

Como se pretende que o conector do tipo Indentado seja o mais leve possível, pois nesta dissertação estamos a analisar sistemas em aço leve, a chapa do conector terá uma espessura de 5 mm. Considera-se ainda por questões conservativas que, para um conector deste tipo a altura útil contabilizada é a referente à chapa inteira, ou seja, é a altura sem contar com a altura das ranhuras. Assim, o conector Indentado pode ter uma altura total (com ranhuras) de 220 mm mas a sua altura útil é de 140 mm. Como este conector é em aço enformado a frio e devido a questões de disponibilidade do mercado este conector terá uma tensão de cedência de 220 MPa. Deste modo, o modelo escolhido para solução com laje nervurada e com conector do tipo Indentado é o Modelo K.

Os modelos de laje maciça, por questões comparativas, terão de possuir as mesmas dimensões e portanto escolheu-se os Modelos U e X, para as soluções com conector Indentado e com conector Xadrez, respetivamente.

CAPÍTULO 4

Modelo Numérico

Neste capítulo pretende-se realizar a modelação das vigas mistas de modo a estimar o seu comportamento à flexão. Para tal, utilizar-se-á o *Software ATENA 3D* para modelar a viga mista com o conector de chapa nervurada do tipo Xadrez (Provete 1) e a viga mista com o conector de chapa lisa do tipo Indentado (Provete 2). Por simplificação, na modelação das vigas mistas a chapa perfilada não será modelada, e, como esta possui um papel secundário, admite-se a hipótese de que não afetará muito os resultados da análise das vigas mistas. Deste modo, facilita-se bastante a criação da malha de elementos finitos do modelo, reduzindo assim o tempo de análise. Também por simplificação, o conector de chapa nervurada do tipo Xadrez será modelado como uma chapa lisa. O contributo das pequenas nervuras que este na realidade possui será incorporado através da consideração de uma lei de interface entre os dois materiais.

Para efeitos de comparação de resultados estudar-se-á também mais dois modelos, tendo estes uma laje maciça na sua composição. Um modelo corresponde a uma viga mista com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez e o outro corresponde a uma viga mista com conector de chapa lisa do tipo Indentado.

Posteriormente à definição das propriedades dos materiais, das geometrias e das condições fronteira, serão analisados os modelos através do método de elementos finitos, tendo por base a geração de uma malha compatível com cada modelo.

Como existem diversas incertezas sobre vários parâmetros, os quais só serão conhecidos quando forem realizados ensaios, efetuar-se-á uma análise de sensibilidade onde serão definidos vários modelos vocacionados para a previsão do comportamento à flexão, alterando-se apenas uma condição ou variável em cada um dos modelos. Estas alterações são efetuadas ao nível das características dos materiais e ao nível das características da conexão.

O processo de calibração dos modelos basear-se-á nestas pequenas variações, obtendo-se assim modelos próximos do comportamento esperado, mas com diversas condições/variáveis diferentes em cada um deles.

4.1 Modelo base

O modelo base será apresentado de uma forma mais detalhada, uma vez que todos os modelos desenvolvidos seguirão o mesmo processo de modelação e calibração. Posto isto, nos próximos

modelos apenas se descreverá o parâmetro que irá sofrer alterações em relação ao modelo de base. Para cada um dos modelos, será também apresentado e analisado os resultados do seu comportamento.

Os modelos base foram selecionados com base nos modelos envolvidos na análise paramétrica efetuada no Capítulo 3. Para esta seleção, foram tidos em conta os pressupostos já referidos no Capítulo 3 e também a facilidade de construção dos provetes. Deste modo, houve a necessidade de entrar em contacto com o mercado para conhecer a disponibilidade dos elementos a utilizar na construção dos provetes, ou seja, conhecer as geometrias disponíveis para os perfis “C”, para a chapa perfilada e para a chapa nervurada do tipo Xadrez, bem como o tipo de aço disponível para este tipo de elementos. Também se analisou a possibilidade de fabricação do conector de chapa lisa do tipo Indentado e o material de aço a utilizar.

Em termos geométricos, existe ainda o cuidado de se selecionar um vão pouco extenso, para que a rotura dos provetes seja condicionada por corte e não por flexão. Outro aspeto condicionante na definição do vão é o comprimento da chapa perfilada. No caso presente, não se pretendeu que a chapa perfilada fosse cortada, tal como já foi referido nos pressupostos do Capítulo anterior.

Deste modo considerou-se as mesmas geometrias, para ambas os modelos de lajes, laje nervurada e laje maciça, para posteriormente se poder realizar uma análise comparativa entre estas. Nos modelos de laje nervurada o eixo neutro (e.n.) plástico situa-se no banzo superior no perfil, enquanto que nos modelos de laje maciça o eixo neutro plástico já se situa na laje. Para que o e.n. dos modelos de laje nervurada subisse para a laje, a largura desta teria de aumentar um pouco, contudo a sua dimensão já não iria ficar com um valor arredondado e portanto decidiu-se manter a largura igual a 350 mm.

Assim, para representar a viga mista de laje nervurada com conector do tipo Indentado selecionou-se o Modelo K, para representar a viga mista de laje nervurada com conector do tipo Xadrez selecionou-se o Modelo S, para reproduzir a viga mista de laje maciça com conector do tipo Indentado escolhe-se o Modelo U e para recriar a viga mista de laje maciça com conector do tipo Xadrez optou-se pelo Modelo X.

4.1.1 Materiais

Os materiais a atribuir a cada macroelemento foram definidos diretamente, com base em leis constitutivas adequadas a cada tipo de material. Uma parte dos parâmetros necessários já estão pré-definidos no *software*, no entanto, estes podem ser alterados (Červenka & Procházková, 2014).

A viga metálica é constituída por dois perfis “C” de aço e a lei constitutiva a ser utilizada é a *3D Bilinear Steel Von Mises*, onde se considera um comportamento elástico-plástico perfeito do material e se associa o critério de rotura de *Von Mises* (ver Figura 4.1). O aço utilizado nos

perfis enformados a frio com secção “C” apresenta valores nominais para o módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e para a tensão de cedência (f_y) de 280 MPa. (Červenka & Procházková, 2013).

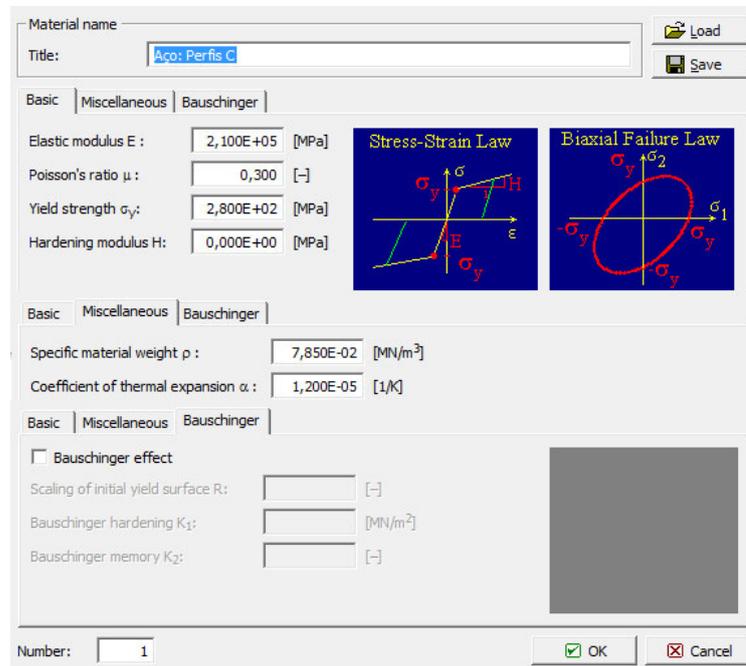
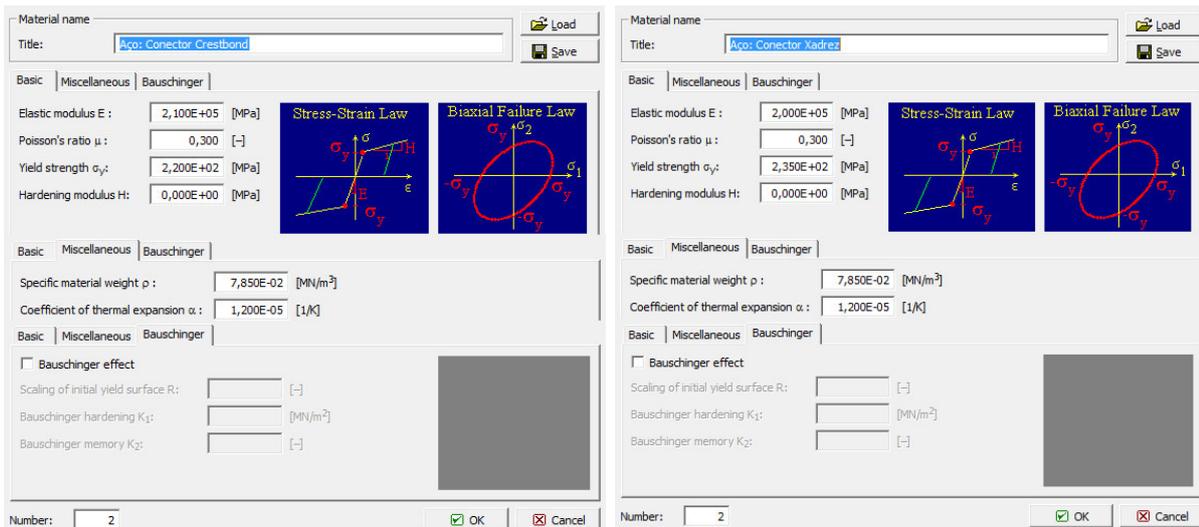


Figura 4.1 - Lei constitutiva definida no *Software ATENA 3D* para os perfis com secção transversal em “C”.

Também para os conectores de aço, a lei constitutiva escolhida é a *3D Bilinear Steel Von Mises*. O conector de chapa lisa do tipo Indentado é de aço enformado a frio e possui um módulo de elasticidade (E) de 210 GPa e uma tensão de cedência (f_y) de 220 MPa (valores nominais). Já o conector de chapa nervurada do tipo Xadrez possui um módulo de elasticidade (E) de 200 GPa e uma tensão de cedência (f_y) de 275 MPa, pois é de aço laminado a quente (ver Figura 4.2).

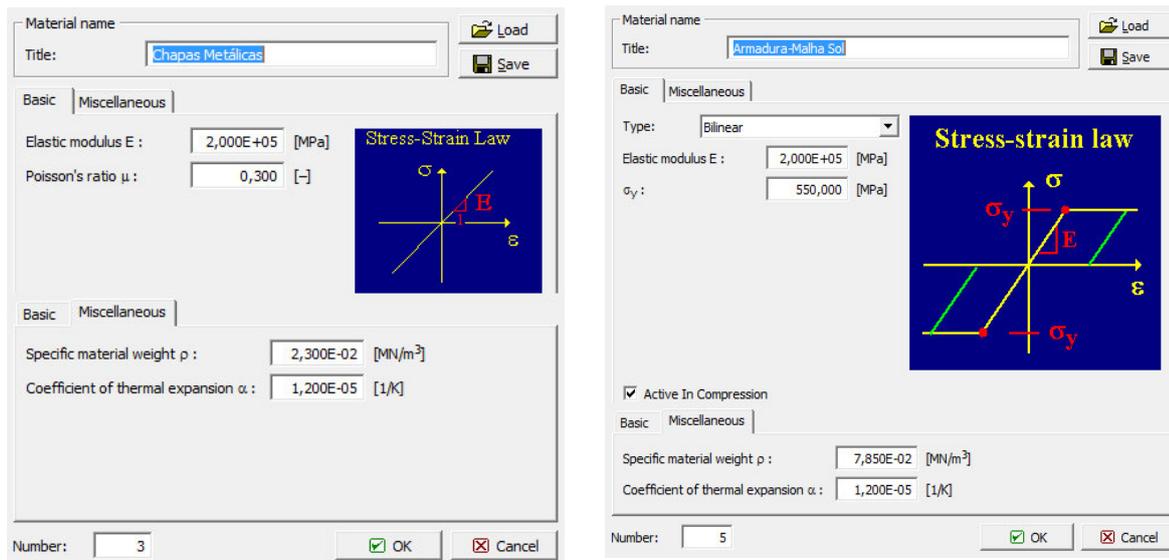


(a) Conector de chapa lisa do tipo Indentado (b) Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez

Figura 4.2 - Leis constitutivas definidas no *Software ATENA 3D* para os conectores utilizados.

As chapas metálicas, como a chapa de base nos apoios, as nervuras laterais e a chapa sobre a laje de betão possibilitam uma melhor distribuição de carga e são de aço. O material nelas utilizado tem por base a lei constitutiva *3D Elastic Isotropic*, definindo-as assim como um material com comportamento elástico e isotrópico, uma vez que a sua capacidade resistente não é relevante (ver Figura 4.3(a)). O módulo de elasticidade definido para as chapas metálicas é de 200 GPa.

Para modelar a armadura a lei constitutiva utilizada é a *Reinforcement* que considera um comportamento elástico-perfeitamente plástico (ver Figura 4.3(b)). O módulo de elasticidade (E) considerado foi de 200 GPa e a tensão de cedência (σ_y) foi de 550 MPa.



(a) Chapas metálicas

(b) Armaduras

Figura 4.3 - Leis constitutivas definidas no *Software ATENA 3D* para as chapas metálicas e armaduras.

As propriedades do betão são definidas com base na lei constitutiva *3D Nonlinear Cementitious 2* que considera um comportamento não-linear do betão tanto à compressão como à tração. O betão é de classe C25/30 e portanto possui um módulo de elasticidade secante (E_{cm}) de 31,5 GPa, um valor característico da tensão de rotura aos 28 dias de idade em cubos ($f_{ck,cube}$) de 30 MPa, um valor médio da tensão de rotura do betão à tração simples (f_{ctm}) de 2,6 MPa e um valor médio da tensão de rotura do betão à compressão (f_{cm}) de 38 MPa (ver Figura 4.4).

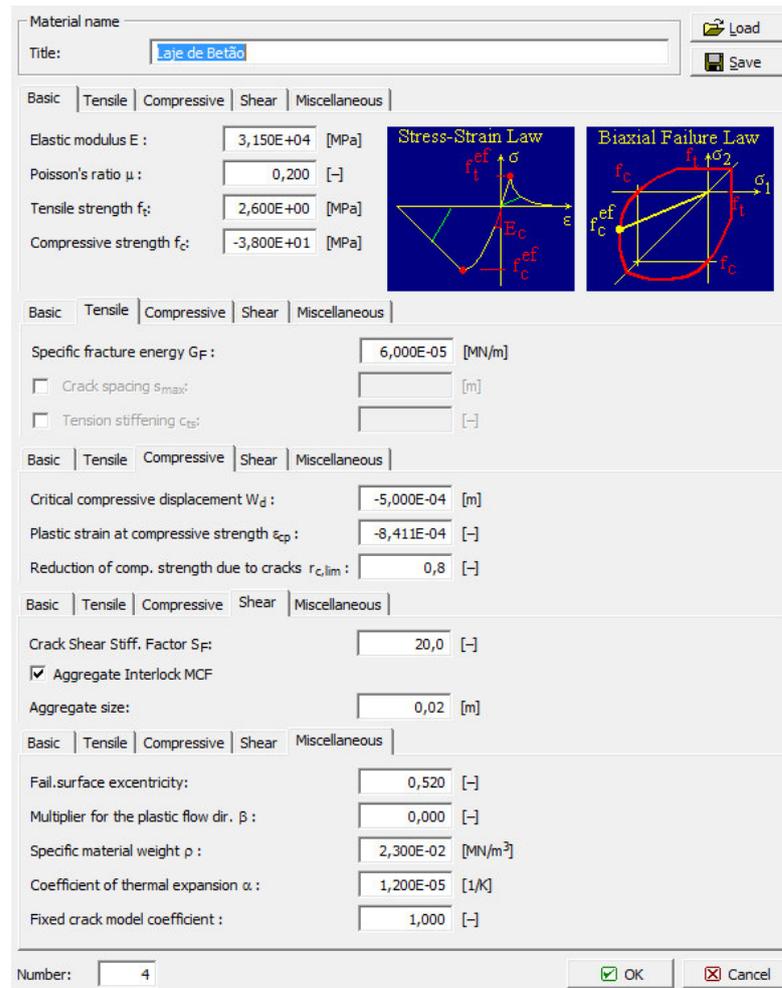


Figura 4.4 - Lei constitutiva definida no *Software ATENA 3D* para a laje de betão.

Todos os parâmetros dos materiais que não forem aqui descritos, são valores adotados tendo por base o preenchimento inicialmente efetuado por defeito.

Na Tabela 4.1 apresenta-se uma síntese das propriedades dos materiais bem como a lei constitutiva utilizada para cada um dos elementos.

Tabela 4.1 - Valores dos parâmetros considerados na definição das leis constitutivas definidas no *Software ATENA 3D*.

Perfis “C”	Conector Xadrez	Conector Indentado	Chapas Metálicas	Betão	Armadura
3D Bilinear Steel Von Mises	3D Bilinear Steel Von Mises	3D Bilinear Steel Von Mises	3D Elastic Isotropic	3D Nonlinear Cementitious 2	Reinforcement
$E = 210 \text{ GPa}$	$E = 200 \text{ GPa}$	$E = 210 \text{ GPa}$	$E = 200 \text{ GPa}$	$E = 31,5 \text{ GPa}$	$E = 200 \text{ GPa}$
$\mu = 0,3$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,2$	
$f_y = 280 \text{ MPa}$	$f_y = 235 \text{ MPa}$	$f_y = 220 \text{ MPa}$			$\sigma_y = 550 \text{ MPa}$
$\rho = 7,85 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$	$\rho = 7,85 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$	$\rho = 7,85 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$	$\rho = 2,30 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$	$\rho = 2,30 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$	$\rho = 7,85 \times 10^{-2} \text{ MN/m}^3$
$\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/k}$					
				$f_{ck,cube} = 30 \text{ MPa}$	
				$f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$	
				$f_{cm} = 38 \text{ MPa}$	
				$G_f = 6,0 \times 10^{-5} \text{ MN/m}$	
				$W_d = -5,000 \times 10^{-4} \text{ m}$	
				$\varepsilon_{cp} = -8,411 \times 10^{-4}$	

4.1.2 Geometria

A modelação dos elementos estruturais efetua-se através da criação de pontos com base no referencial do *Software*. Estes pontos são unidos através de linhas que por sua vez formam superfícies gerando assim os macroelementos.

Antes dos macroelementos serem gerados as suas propriedades têm de ser definidas, ou seja, tem de se atribuir um material.

Outro aspeto que é importante referir é a criação de geometrias curvilíneas. O *Software* não permite modelar geometrias curvilíneas, pelo que é necessário encontrar alternativas, como por exemplo a criação de vários pontos que formem uma linha poligonal que se aproxima da linha curva pretendida.

Para a modelação das vigas mistas achou-se oportuno apenas modelar um quarto de viga, de modo a reduzir o tempo de processamento e o esforço computacional na análise do modelo.

De seguida, apresenta-se o processo de modelação dos diversos componentes das vigas mistas.

4.1.2.1 Viga Metálica

Por efeito de simetria, foi apenas modelado um perfil metálico. No entanto, não se considerou as abas extremas do mesmo, com o objetivo de simplificar o modelo numérico. Posto isto, determinou-se uma nova espessura equivalente tendo por base a inércia e a área do perfil de secção “C”, como se pode verificar a partir da Equação (4.1). Na Figura 4.5 pode-se visualizar o perfil equivalente que resultou da aplicação da Equação (4.1).

$$\begin{cases} I_y = 1813987mm^4 \\ A = 584mm^2 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{e \times 140^3}{12} + 2 \times \left(\frac{(B-e) \times e^3}{12} + (B-e) \cdot e \cdot \left(70 - \frac{e}{2} \right)^2 \right) = 1813987 \\ 140 \times e + 2 \times (B-e) \times e = 584 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \frac{e \times 140^3}{12} + 2 \times \left(\frac{(B-e) \times e^3}{12} + (B-e) \cdot e \cdot \left(70 - \frac{e}{2} \right)^2 \right) - 1813987 = 0 \\ B = \frac{2 \cdot e^2 - 140 \cdot e + 584}{2 \cdot e} \end{cases} \Leftrightarrow \tag{4.1}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} e = 2,198727mm \\ B = 65,002836mm \end{cases}$$

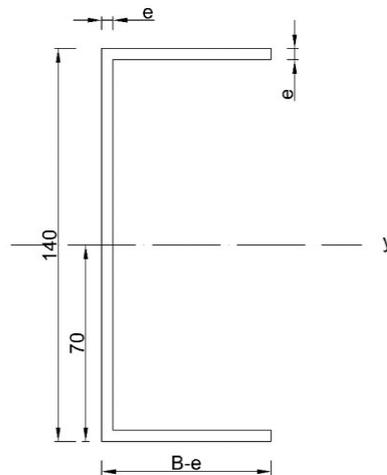


Figura 4.5 - Perfil com secção "C" equivalente.

Após determinar a espessura equivalente optou-se por modelar o Perfil “C” dividindo-o em 3 macroelementos, correspondentes á alma e aos banzos. Na Figura 4.6(a) é possível visualizar o Perfil equivalente enformado a frio com secção “C”.

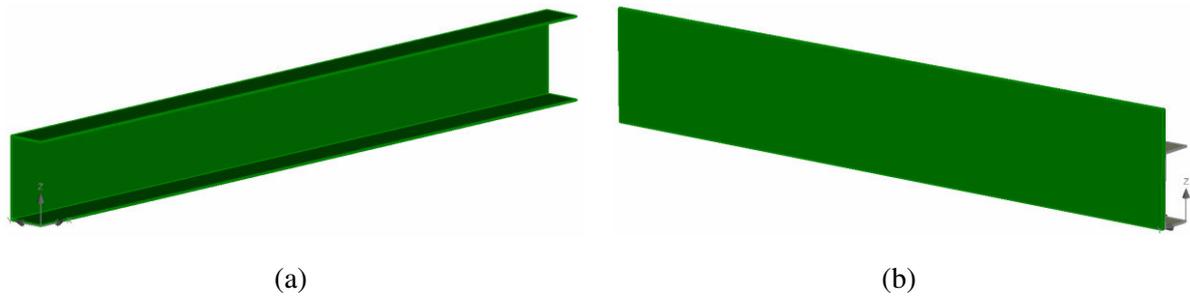


Figura 4.6 - Geometria da viga metálica e geometria do conector Xadrez no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.2 Conector Indentado

Para se obter a geometria do conector de chapa lisa do tipo Indentado dividiu-se o mesmo em 8 macroelementos. Como se pode verificar na Figura 4.7, um macroelemento possui formato retangular e os restantes, que são os “dentes” do conector, possuem uma geometria curvilínea nos cantos, a qual foi modelada pela divisão da superfície curva em 4 superfícies retas em cada canto do “dente” do conector. Para cada um destes “dentes” foram definidos 40 pontos, 60 linhas e 22 superfícies. Quanto mais pontos fossem usados maior era a precisão do modelo, no entanto, decidiu-se apenas colocar 40 pontos para não se atingir um esforço computacional demasiado elevado.

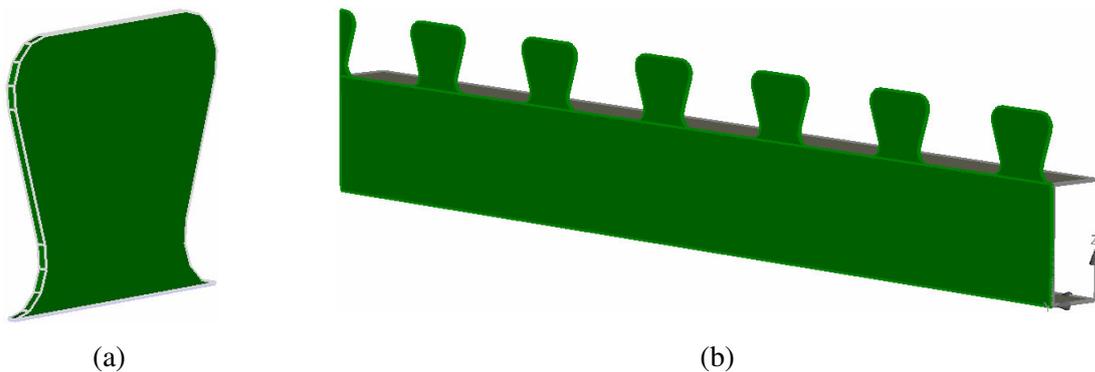


Figura 4.7 - Geometria do conector Indentado no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.3 Conector Xadrez

A Geometria do Conector Xadrez foi concebida apenas com um macroelemento com forma retangular, no entanto por simplificação não se consideraram as suas nervuras, modelado-se o conector como uma chapa lisa de 6 mm de espessura. A Figura 4.6(b) demonstra o macroelemento que desempenha o papel de conector Xadrez.

4.1.2.4 Laje de betão nervurada com conector Indentado

A laje de betão foi modelada com várias partições, ou seja, dividida em vários macroelementos. Como a configuração da chapa perfilada influência a laje de betão, esta deteve uma atenção especial na sua modelação, sendo que para tal foram modelados 25 macroelementos (ver Figura

4.8(a)). Também nos contornos da parte superior do conector foi necessário dividir a laje do betão em mais um macroelemento com formato retangular (ver Figura 4.8(b)). Existirá também mais 13 macroelementos correspondentes ao betão inserido entre os dentes do conector (ver Figura 4.8(c)).

A laje de betão nervurada não está em contacto com a viga metálica, está 1 mm distanciada da viga, pois esse 1mm corresponde a espaço ocupado pela chapa perfilada que não vai ser aqui modelada.

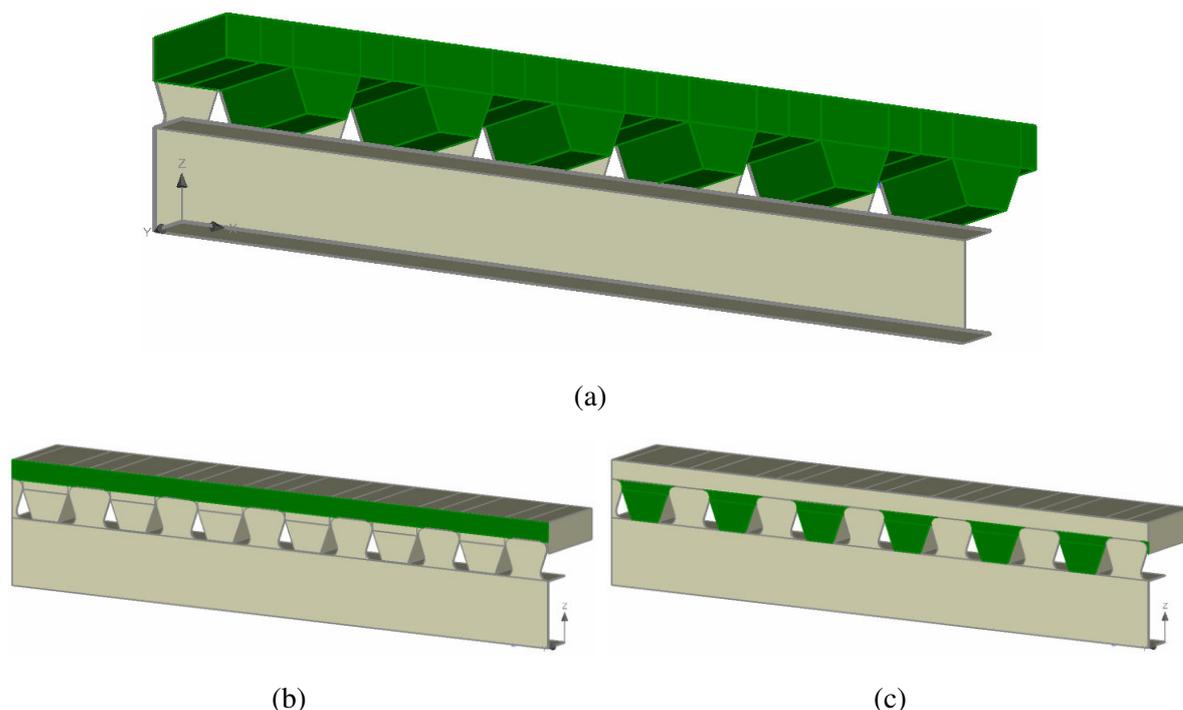


Figura 4.8 - Geometria da laje de betão nervurada com o conector Indentado no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.5 Laje de betão nervurada com conector Xadrez

No caso da viga mista de chapa do tipo Xadrez apenas existirão os 25 macroelementos devido à configuração da chapa perfilada (ver Figura 4.9(a)) e o macroelemento nos contornos da parte superior do conector (ver Figura 4.9(b)). Também neste caso a laje de betão nervurada não vai estar em contacto com a viga metálica, pelas razões já mencionadas anteriormente.

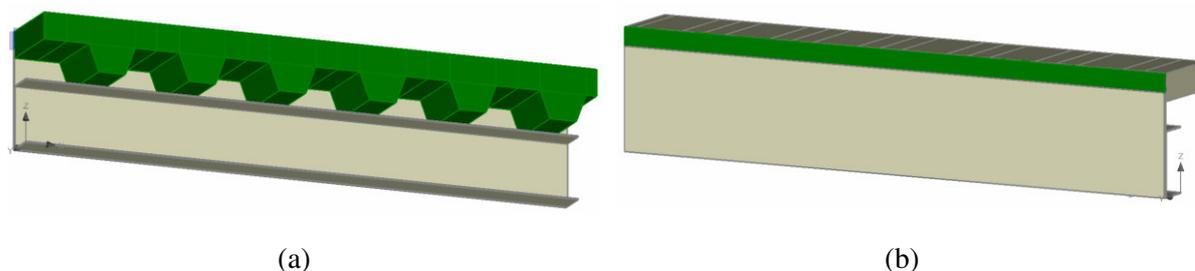


Figura 4.9 - Geometria da laje de betão nervurada com o conector Xadrez no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.6 Laje de betão maciça com conector Indentado

A laje de betão será modelada em várias partes, ou seja, para representar esta laje serão modelados diversos macroelementos. Um dos macroelementos é retangular com 1 mm de distância da viga metálica, de modo a compatibilizar os modelos anteriores (ver Figura 4.10(a)). Por cima do conector existirá outro macroelemento retangular e entre os “dentes” do conector Indentado existirão também macroelementos a representar a laje maciça (ver Figura 4.10(b) e Figura 4.10(c), respetivamente).

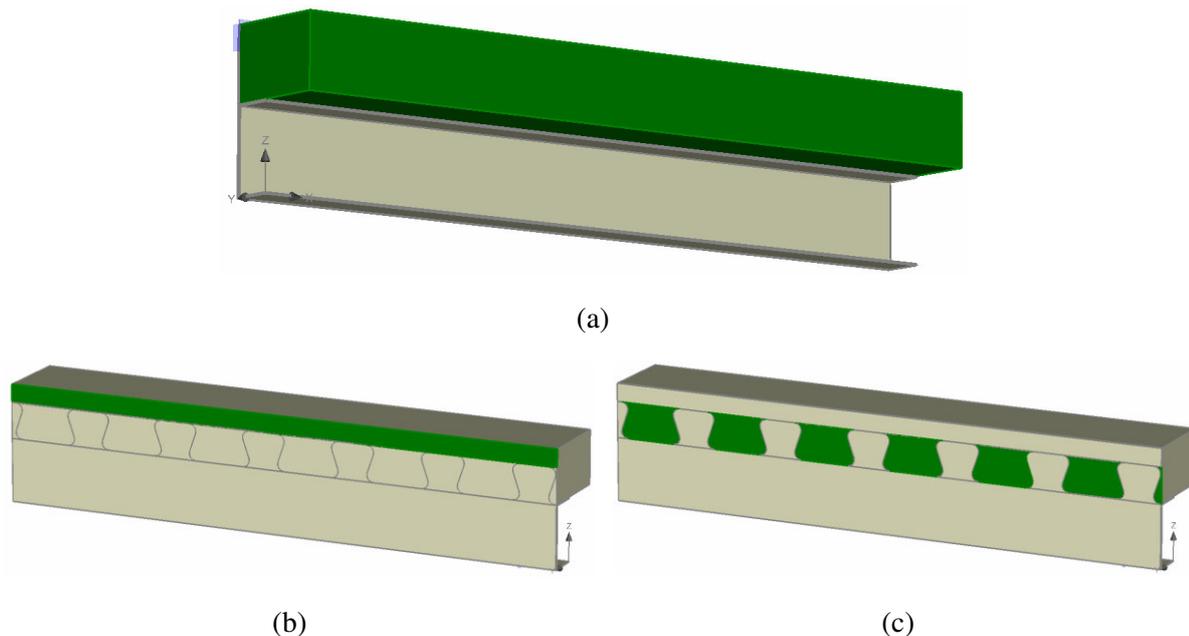


Figura 4.10 – Geometria da laje de betão maciça com o conector Indentado no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.7 Laje de betão maciça com conector Xadrez

Neste modelo o processo de modelação da laje maciça é ainda mais simples. Apenas será necessário modelar dois macroelementos, um retangular que se distânci 1 mm da viga metálica e outro também retangular mas inserido por cima do conector Xadrez (ver Figura 4.11(a) e Figura 4.11(b), respetivamente).

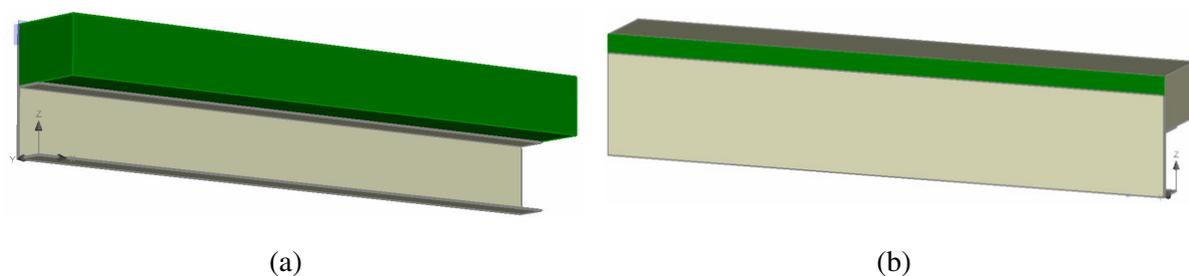


Figura 4.11 - Geometria da laje de betão maciça com o conector Xadrez no *Software ATENA 3D*.

4.1.2.8 Chapas Metálicas para distribuição de carga a meio vão e nos apoios

As chapas metálicas consideradas foram, a chapa de base nos apoios e as nervuras laterais como reforço para assegurar a transmissão de carga até aos apoios. Considerou-se também uma chapa metálica sobre a laje de betão com uma dimensão de $40 \times 20 \times 175 \text{ mm}^2$ com o objetivo de facilitar a aplicação do carregamento na viga mista (ver Figura 4.12).

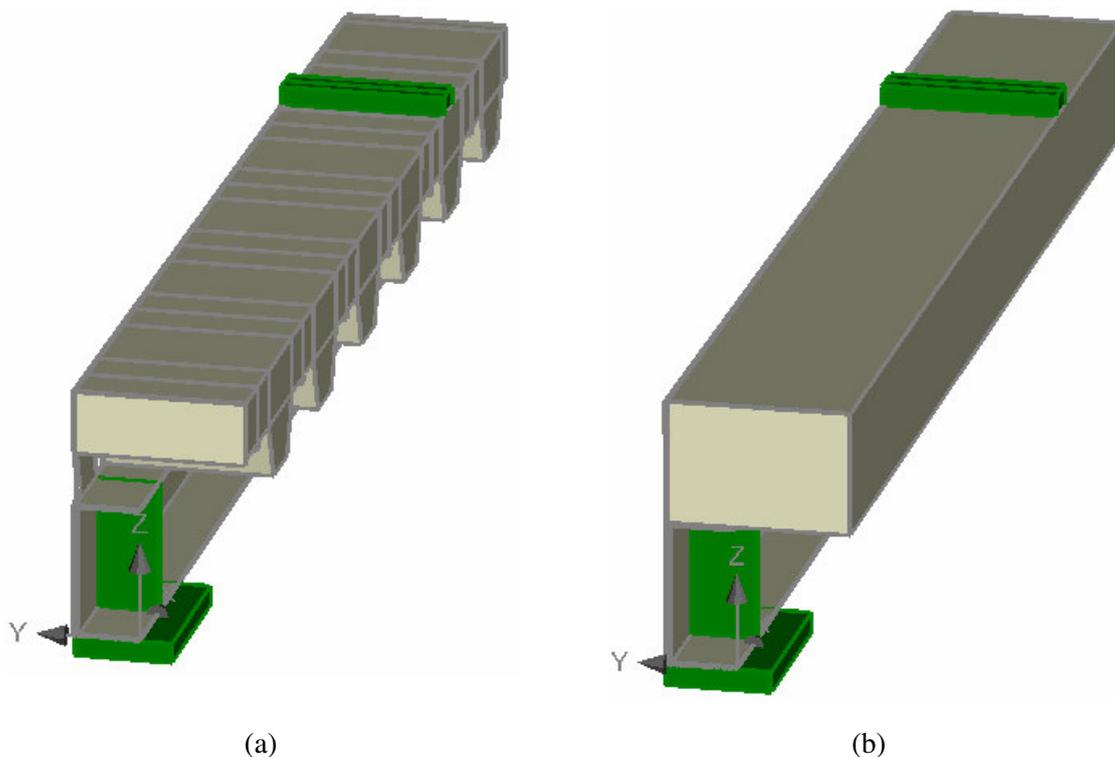


Figura 4.12 - Geometria das chapas metálicas no *Software ATENA 3D*: (a) Viga mista com laje de betão nervurada; (b) Viga mista com laje de betão maciça.

4.1.2.9 Armadura

A armadura transversal a ser colocada nos provetes de tipo 1 e tipo 2 (viga mista com conector do tipo Xadrez e viga mista com conector do tipo Indentado, respetivamente) foi definida com base na secção 6.2.4 do documento NP EN 1992-1-1: 2010, onde se aborda o fenómeno de corte na ligação de almas e banzos. Neste caso, quantificou-se a quantidade de armadura transversal a colocar na laje de betão.

Antes do cálculo da armadura transversal, determinou-se a tensão de corte longitudinal, v_{Ed} , através das Equações (4.2) e (4.3).

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \times \Delta x} = \frac{327,04}{0,120 \times \frac{2172,1}{2}} = 2509,4 \text{ kN} \quad (4.2)$$

$$\Delta F_d = 2 \cdot A_a \times f_{yd} = 2 \times 584 \times \frac{280}{1,0} = 327,04 \text{ kN} \quad (4.3)$$

em que:

h_f espessura total da laje;

ΔF_d variação do esforço normal de corte na laje de betão, ao longo do comprimento Δx ;

Δx comprimento considerado.

A armadura transversal por unidade de comprimento, A_{sf}/s_f , é determinada através das Equações (4.4), (4.5) e (4.6). No caso presente, considerou-se um ângulo θ de $26,5^\circ$.

$$\left(\frac{A_{sf}}{s_f} \right) \geq \frac{v_{Ed} \times h_f / \cot \theta_f}{f_{yd}} \geq \frac{2509,4 \times 10^3 \times 0,120 / \cot(26,5)}{\frac{280}{1,0}} = 5,3620 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{m} \quad (4.4)$$

onde:

$$45^\circ \leq \cot \theta_f \leq 26,5^\circ \quad \text{para banzos comprimidos.} \quad (4.5)$$

$$45^\circ \leq \cot \theta_f \leq 38,6^\circ \quad \text{para banzos tracionados.} \quad (4.6)$$

Por uma questão de simplicidade optou-se por substituir a armadura normalmente utilizada por uma malha sol, de modo a facilitar a preparação do ensaio. Desta forma e juntamente com o sistema misto aqui proposto, que é bastante simples, está-se a contribuir para a redução dos tempos de trabalho, o que em obra é uma mais-valia económica.

Antes da escolha da malha sol efetuou-se uma pesquisa de forma a conhecer a disponibilidade do mercado em função das dimensões dos nossos provetes. Optou-se por dispor uma malha sol de $\phi 8//0,100$ na direção transversal e de $\phi 6,5//0,150$ na direção longitudinal. Assim, a armadura transversal por unidade de comprimento, possui um valor aproximadamente igual à necessária, determinada anteriormente, como se pode verificar na Equação (4.7).

$$\left(\frac{A_{sf}}{s_f} \right) \geq \frac{\pi \times \frac{\phi^2}{4}}{s_f} = \frac{\pi \times \frac{8^2}{4}}{0,100} = 5,0265 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{m} \quad (4.7)$$

Na Figura 4.13 apresenta-se a disposição da armadura em planta e na Figura 4.14 apresenta-se a sua disposição na secção transversal.

A armadura a modelar no *Software ATENA 3D*, diz respeito a apenas $\frac{1}{4}$ de provete, ou seja, teremos somente 2 varões de 6,5 mm de diâmetro na direção longitudinal e 13 varões de 8 mm de diâmetro na direção transversal (ver Figura 4.15).

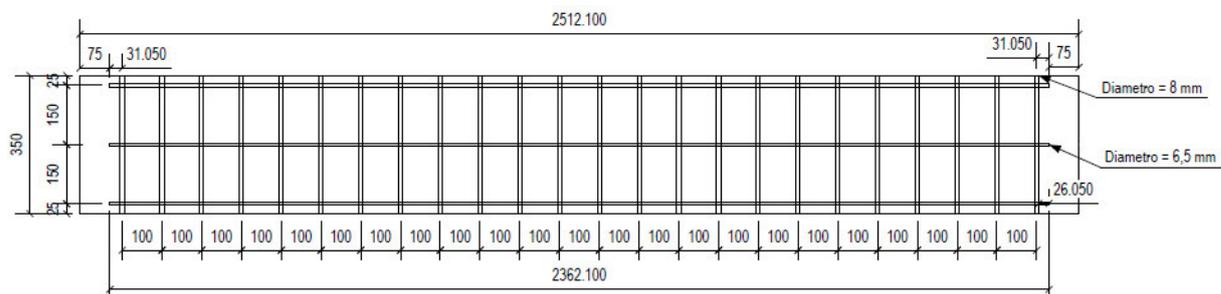


Figura 4.13 - Disposição em planta da armadura.

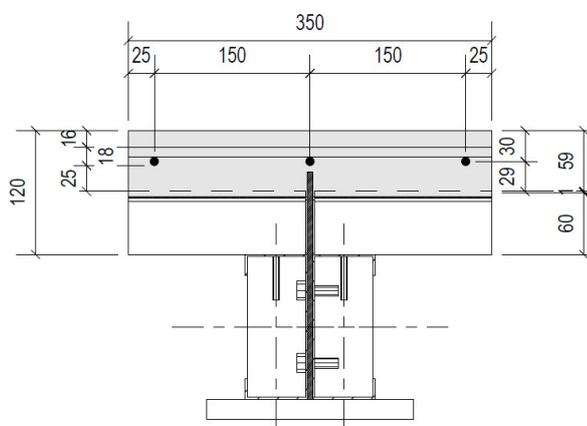


Figura 4.14 - Disposição transversal da armadura.

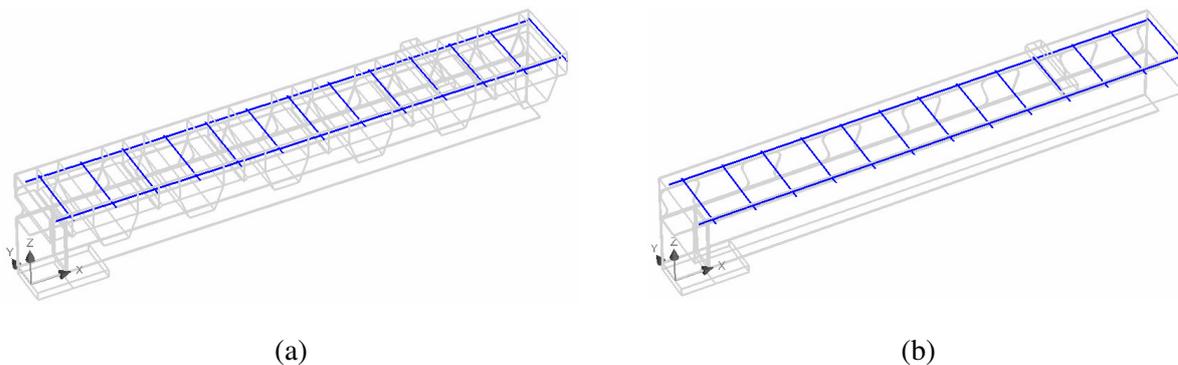


Figura 4.15 - Geometria da armadura no programa de cálculo *ATENA 3D*: (a) Viga mista com laje de betão nervurada; (b) Viga mista com laje de betão maciça.

4.1.3 Definição das superfícies de contacto

O programa de cálculo *ATENA 3D* gera automaticamente as superfícies de contacto entre os planos dos macroelementos. Por defeito, as superfícies de macroelementos diferentes que estejam em contacto são automaticamente definidas pelo programa como sendo uma conexão rígida/perfeita, chamada de *perfect connection*.

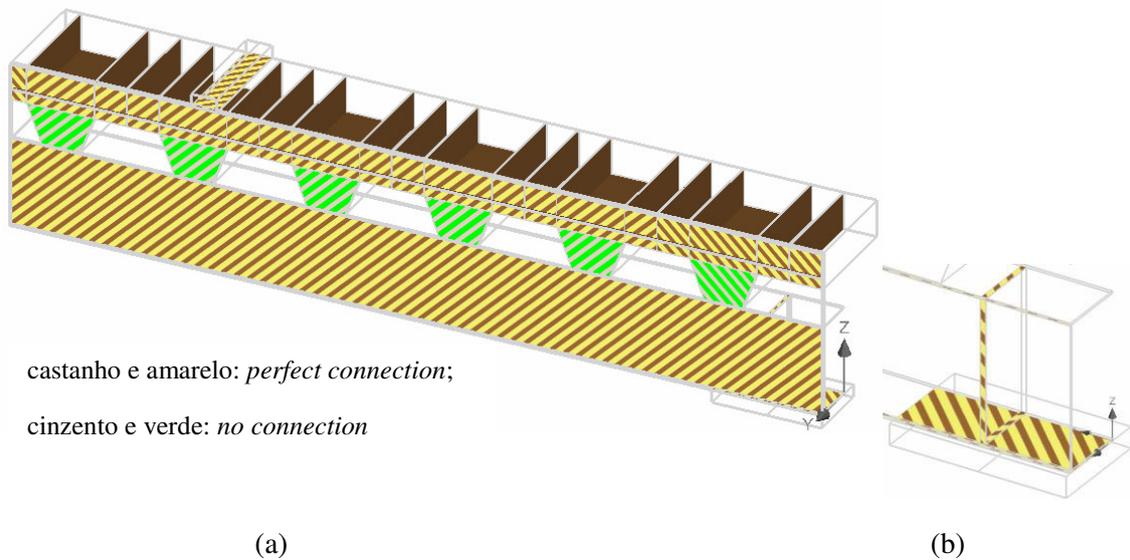


Figura 4.17 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector do tipo Xadrez e laje nervurada.

4.1.3.2 Modelos com a laje de betão maciça

Como se pode visualizar na Figura 4.18(a), na Figura 4.18(b) e na Figura 4.19, no caso dos modelos com a laje maciça as superfícies de contacto possuem ligações rígidas, isto é, todas as ligações são consideradas como *perfect connection*, à exceção da laje de betão entre os “dentes” do conector Indentado, onde a conexão com o macroelemento retangular do conetor foi deligada, de modo a representar o espaçamento de 1mm da laje de betão ao perfil (ver Figura 4.18 (c)).

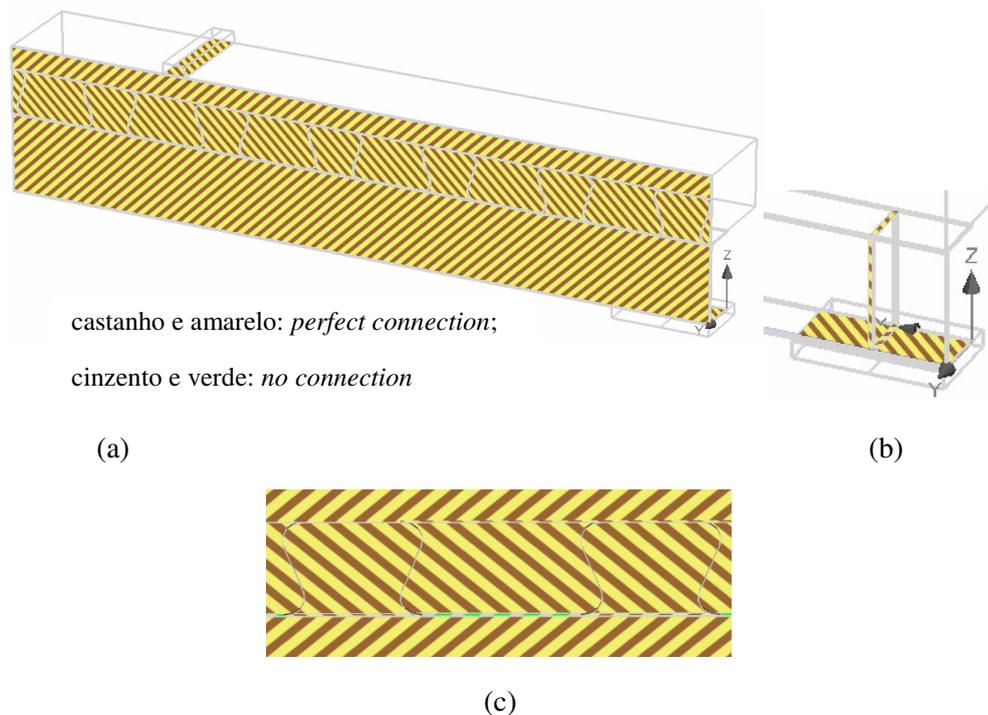


Figura 4.18 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector de chapa lisa do tipo Indentado de laje maciça.

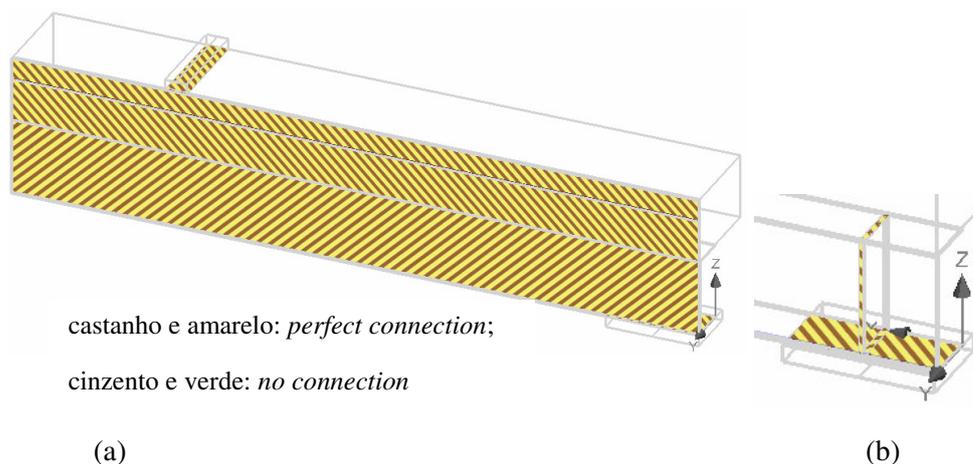


Figura 4.19 - Superfícies de contacto para a viga mista com conector do tipo Xadrez e laje maciça.

4.1.4 Condições de apoio e carregamento

Primeiramente, antes da colocação de apoios e cargas deve-se definir os casos de carga, os quais podem ser de vários tipos. No programa de cálculo utilizado, os casos de carga que são possíveis definir são: *Body forces*; *Forces*; *Supports*; *Prescribed deformations*; *Temperature*; *Shrinkage* e por último *Pre-stressing*.

Para compatibilizar o modelo com o carregamento à flexão que será realizado, os casos de carga que vão ser considerados são o *Supports* (ver Figura 4.20(a)), onde são definidos os apoios e o *Prescribed deformations* (ver Figura 4.20 (b)), onde é definido o incremento de carga, através da imposição de uma deformação incremental.

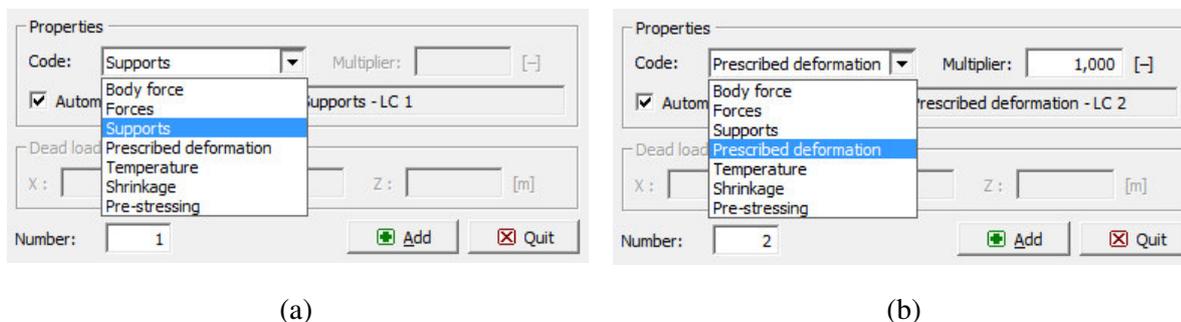


Figura 4.20 - Casos de carga definidos no *Software ATENA 3D*.

Os apoios irão ser introduzidos ao longo das superfícies longitudinais de ambos os modelos, em que os deslocamentos em Y vão ser impedidos (ver Figura 4.21) e ao longo das superfícies transversais, em que os deslocamentos vão ser impedidos na direção X (ver Figura 4.21)

Com estes apoios consegue-se garantir as condições de simetria, por se restringir os deslocamentos perpendiculares aos planos de simetria. Também na chapa de base nos apoios vai ser definido um apoio, como o próprio nome indica, que impede os deslocamentos na vertical (direção Z), numa linha situada ao nível do seu eixo (ver Figura 4.22(b) e Figura 4.23(b)).

O carregamento foi introduzido na chapa metálica sobre a laje, num ponto extremo, na direção Z, mas com sentido oposto (ver Figura 4.22(a) e Figura 4.23(a)). Este deslocamento incremental tem um valor de $-1,0 \times 10^{-5}$ m e vai ser transmitido para a laje de betão, na mesma secção onde o atuador de carga iria solicitar a viga caso se realiza-se um o ensaio experimental.

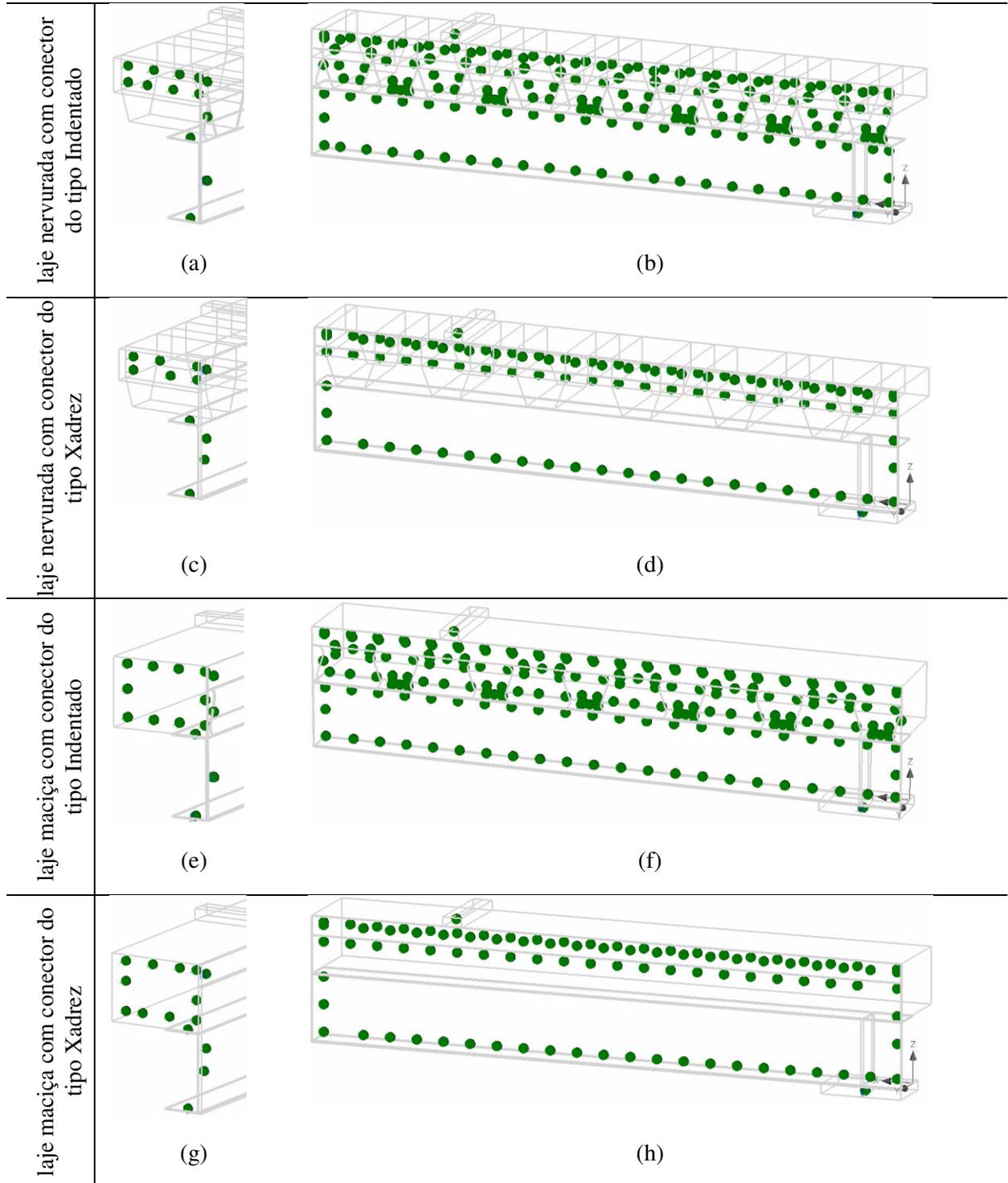


Figura 4.21 - Condições de simetria para as vigas mistas analisadas: (a) Plano transversal de simetria (YZ); (b) Plano longitudinal de simetria (XZ).

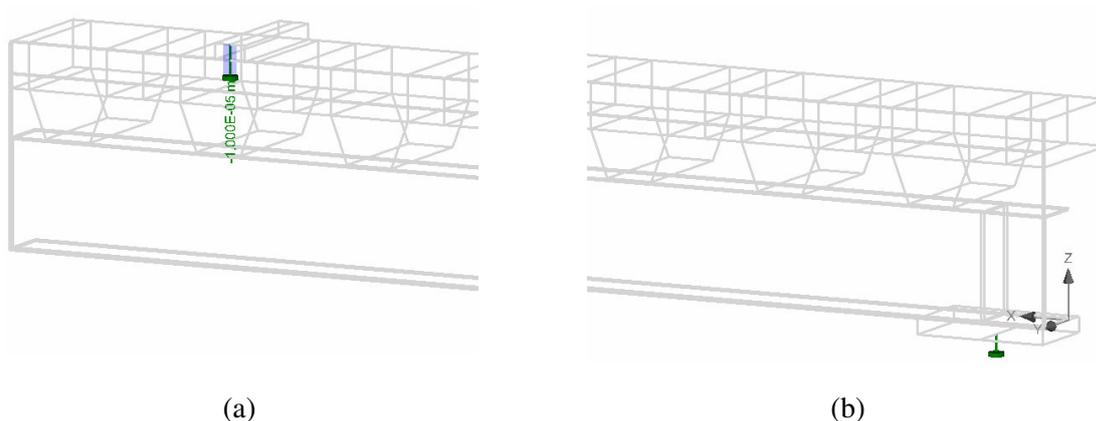


Figura 4.22 – Viga mista de laje nervurada: (a) Condição de carregamento; (b) Condição de apoio.

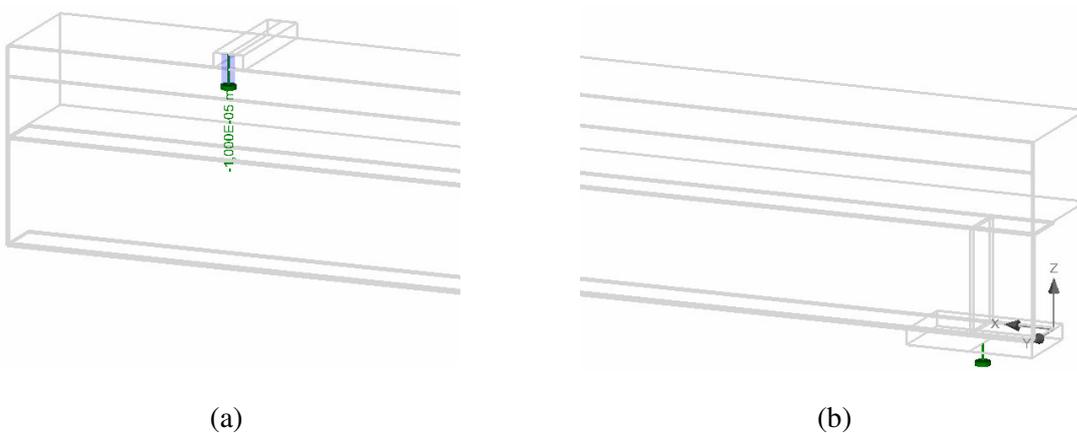


Figura 4.23 - Viga mista de laje maciça: (a) Condição de carregamento; (b) Condição de apoio.

4.1.5 Definição e refinamento da malha

Os elementos finitos que podem ser gerados são de dois tipos: lineares (*linear*) ou quadráticos (*quadratic*). Os elementos lineares são aqueles que possuem um nó em cada canto e os elementos quadráticos são providos de nós em cada canto e também de nós no meio das arestas do elemento ou no interior do mesmo (ver Figura 4.24). No caso presente em estudo os elementos finitos gerados serão do tipo linear.

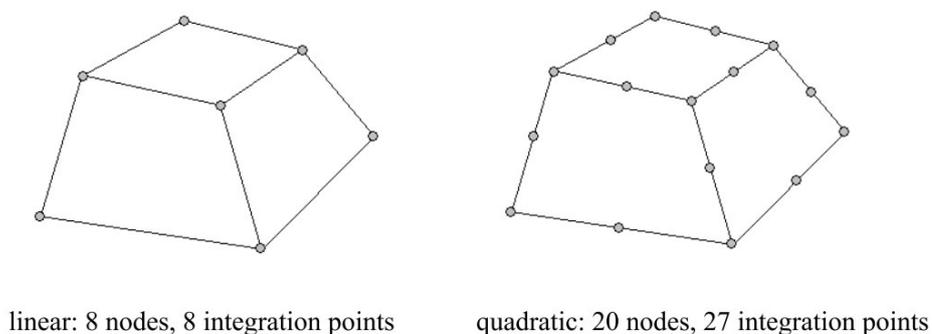


Figura 4.24 - Exemplo de um elemento linear e de um elemento quadrático. (Červenka & Procházková, 2014)

O *Software ATENA 3D* permite a geração de malhas e o seu refinamento ao nível de cada macroelemento. Quanto mais pequena for a dimensão da malha mais precisos são os resultados. No entanto, o tempo de análise é maior, pelo que se exige uma maior memória computacional.

A malha dos macroelementos pode ser de quatro tipos: quadrilátera (*Brick*); tetraédrica (*Tetra*) e mista (*Brick and Tetra*). A malha quadrilátera aplica-se apenas aos elementos prismáticos, ou seja elementos com geometria regular. As malhas tetraédricas e mistas são mais flexíveis ajustando-se melhor a contornos irregulares e portanto podem ser usadas na maior parte das geometrias. Quando se coloca a malha mista o programa define o interior do elemento como uma malha quadrilátera e na zona junto às extremidades como uma malha tetraédrica. Esta malha só funciona corretamente se o seu tamanho for adequado.

Deve-se sempre que possível optar por uma malha quadrilátera, visto que esta conduz a um aumento do número de nós, o que por sua vez se traduz num aumento de informação no modelo.

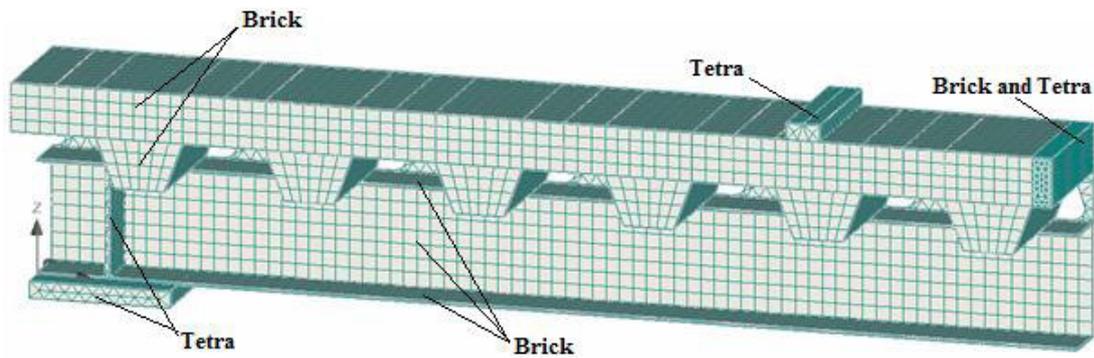
Nos casos analisados, os macroelementos foram divididos em várias partições com o objetivo de implementar uma malha compatível entre os contactos das suas superfícies e também para se conseguir utilizar uma malha quadrilátera um maior número de vezes.

4.1.5.1 Definição da malha no caso da viga com laje nervurada e conector Indentado

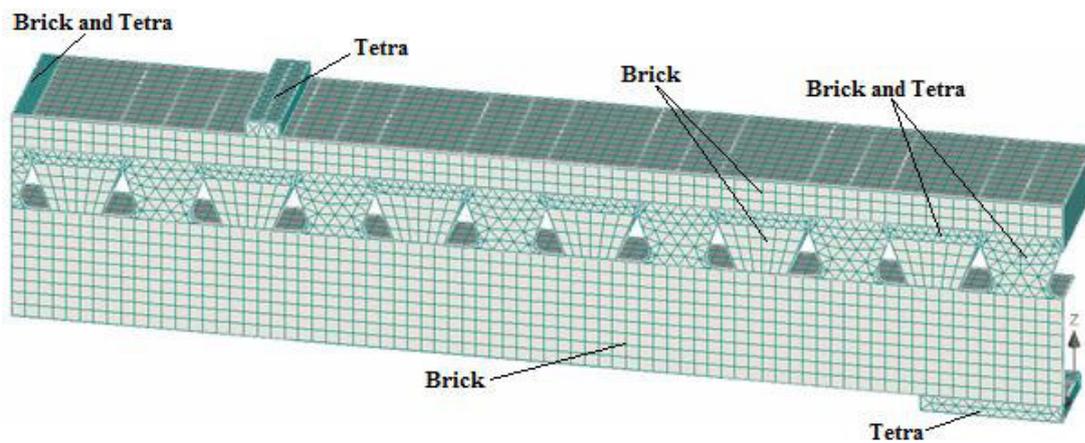
Na viga mista com conector do tipo Indentado (Provete 2), o macroelemento retangular do conector Indentado, o perfil com secção “C” e a maior parte dos macroelementos que compõe a laje de betão, apresentam uma malha quadrilátera. As chapas metálicas, por apresentarem características elásticas tiveram de ser definidas com uma malha tetraédrica. É importante referir que os elementos tetraédricos lineares não são geralmente recomendados para análise, embora neste caso sejam considerados na modelação das chapas metálicas, já que a análise precisa das tensões e deformações é apenas importante na viga mista. Os “dentes” do conector Indentado e algumas partições da laje de betão possuem uma malha mista devido à sua geometria irregular.

A Figura 4.25 apresenta a configuração da malha no caso da viga mista de laje nervurada com conector do tipo Indentado. Neste modelo, a malha definida possui uma dimensão variável, isto porque após definir o tamanho global da malha, em cada macroelemento esta pode ter o mesmo valor ou um valor mais pequeno.

Na Tabela 4.2 apresenta-se o tamanho, o tipo de malha utilizada e o valor do seu refinamento ao nível de cada macroelemento.



(a) Lado exterior



(b) Lado interior

Figura 4.25 - Tipos de malha definidos na viga mista com laje nervurada e conector do tipo Indentado.

Tabela 4.2 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Indentado.

Tamanho global da malha = 0,01625 m		
Macroelemento	Tipo de Malha	Rácio
Perfil "C"	Brick	1
Conector Indentado (retângulo)	Brick	1
Dentes do conector Indentado	Brick and Tetra	1
Chapas metálicas	Tetra	1
Laje de betão na parte superior dos contornos do conector	Brick	1
Laje de betão nervurada	Brick and Tetra/Brick	0,5/1
Laje de betão inserida no conector	Brick and Tetra/Brick	0,8/1

4.1.5.2 Definição da malha no caso da viga com laje nervurada e conector Xadrez

No caso da viga mista com conector do tipo Xadrez (Provete 1), todos os macroelementos que compõem a laje de betão apresentam uma malha quadrilátera. As chapas metálicas apresentam uma malha tetraédrica, como já foi explicado para o caso do conector Indentado. Neste modelo não existem macroelementos com malha mista, pois todas as componentes apresentam uma geometria muito regular.

Na Figura 4.26 está representada a malha para a viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez.

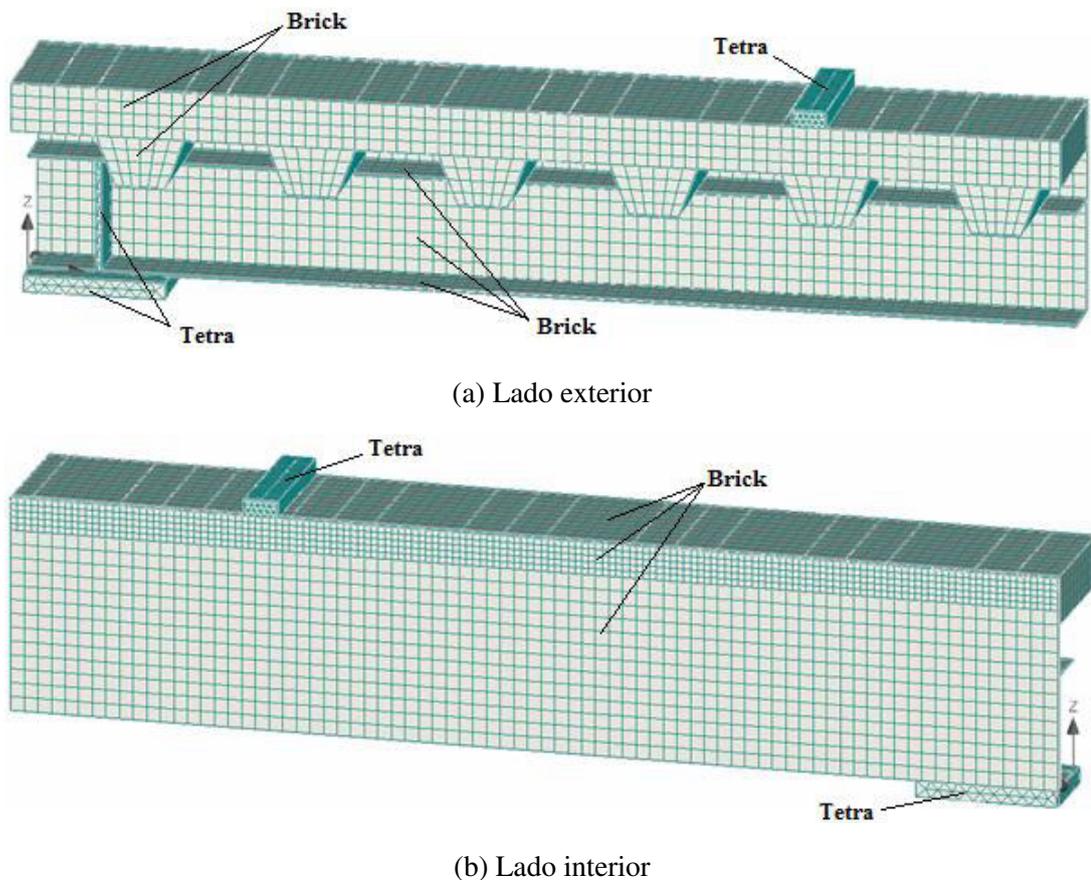


Figura 4.26 - Tipos de malha definidos na viga mista com laje nervurada come conector do tipo Xadrez.

Como se pode verificar a malha definida para este modelo também possui uma dimensão variável.

Na Tabela 4.3 apresenta-se o tamanho da malha utilizado, bem como o seu tipo e o valor do refinamento ao nível dos macroelementos.

Tabela 4.3 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez.

Tamanho global da malha = 0,01625 m		
Macroelemento	Tipo de Malha	Rácio
Perfil "C"	Brick	1
Conector Xadrez	Brick	1
Chapas metálicas	Tetra	1/0,5
Laje de betão na parte superior dos contornos do conector	Brick	0,5
Laje de betão nervurada	Brick and Tetra/Brick	1

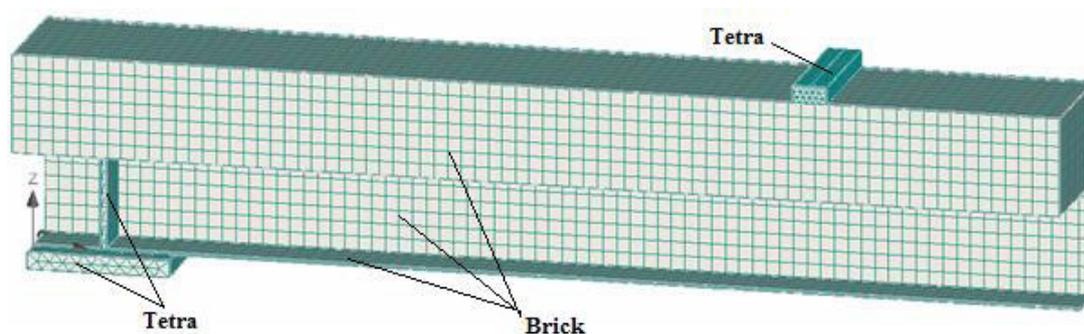
4.1.5.3 Definição da malha no caso da viga com laje maciça e conector Indentado

Como se pode constatar através da Figura 4.27, a malha definida para este modelo é idêntica à definida no modelo da viga mista com laje nervurada e conector Indentado. Assim, os "dentes" do conector e a parte da laje de betão posicionada entre os mesmos possuem uma malha mista, enquanto o perfil de secção "C", os restantes macroelementos da laje de betão e o macroelemento retangular do conector apresentam uma malha quadrilátera.

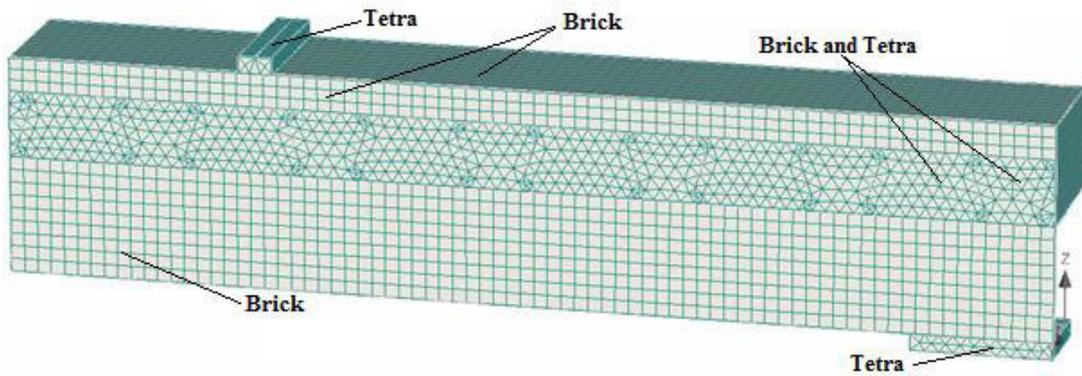
Como já foi referido, as chapas metálicas por apresentarem características elásticas apresentam uma malha tetraédrica.

Neste modelo, todos os macroelementos possuem uma dimensão de malha igual ao valor global definido.

Na Tabela 4.4 apresenta-se o valor utilizado para o tamanho da malha bem como o tipo de malha utilizada.



(a) Lado exterior



(b) Lado interior

Figura 4.27 - Tipos de malha definidos na viga mista de laje nervurada com conector do tipo Indentado.

Tabela 4.4 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje maciça e conector do tipo Indentado.

Tamanho global da malha = 0,01625 m		
Macroelemento	Tipo de Malha	Rácio
Perfil “C”	Brick	1
Conector Indentado (retângulo)	Brick	1
Dentes do conector Indentado	Brick and Tetra	1
Chapas metálicas	Tetra	1
Laje de betão na parte superior dos contornos do conector	Brick	1
Laje de betão maciça	Brick and Tetra/Brick	1
Laje de betão inserida no conector	Brick and Tetra/Brick	1

4.1.5.4 Definição da malha no caso da viga com laje maciça e conector Xadrez

O modelo da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez apresenta uma malha igual à do modelo de laje nervurada com conector do tipo Xadrez. Todos os macroelementos possuem uma malha quadrilátera, devido à sua geometria bastante regular. Apenas as chapas metálicas, como em todos os modelos, possuem uma malha tetraédrica como já foi explicado anteriormente.

Na Figura 4.28 é possível observar a malha concebida para a viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez.

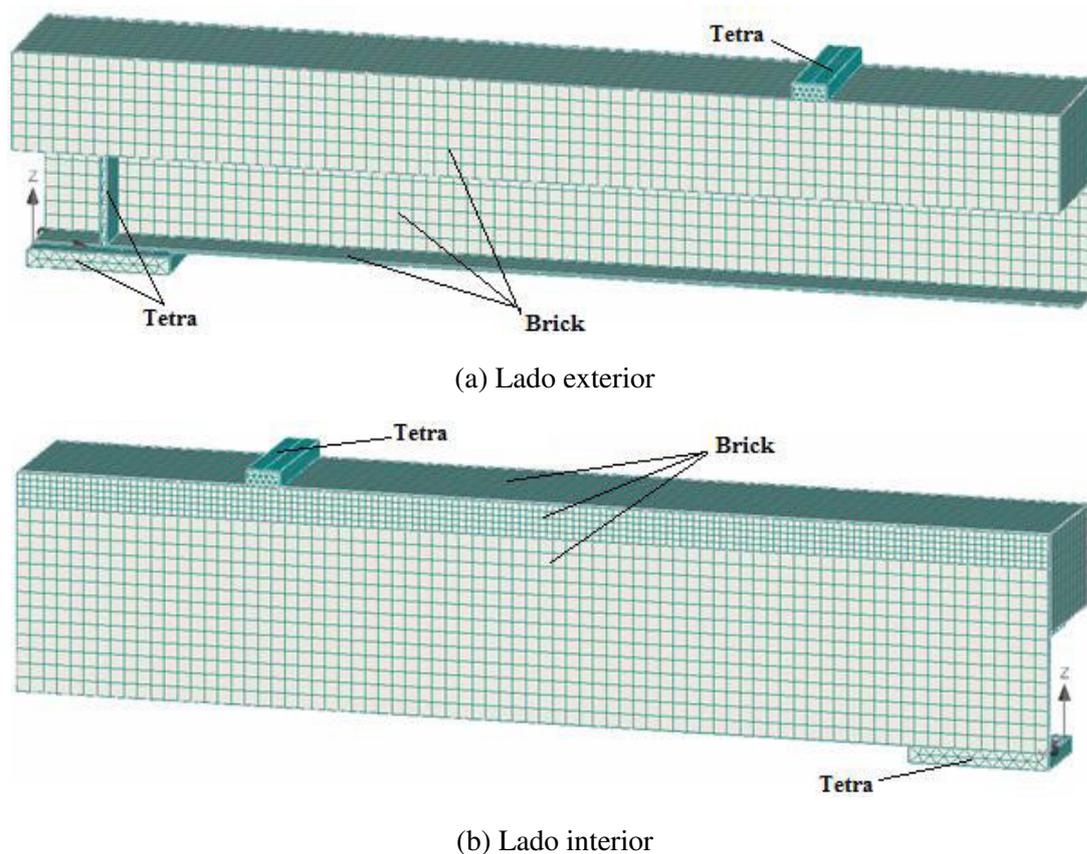


Figura 4.28 - Tipos de malha definidos na viga mista de laje maciça com conector do tipo Xadrez.

Como se pode verificar, a malha definida para este modelo também possui uma dimensão variável. No entanto, o valor da malha global e o valor do refinamento ao nível de cada macroelemento são iguais aos do modelo da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez.

Na Tabela 4.5 apresenta-se o valor utilizado para o tamanho da malha bem como o tipo de malha utilizada e o valor do seu refinamento em cada macroelemento.

Tabela 4.5 - Refinamento da malha no modelo numérico da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez.

Tamanho global da malha = 0,01625 m		
Macroelemento	Tipo de Malha	Rácio
Perfil "C"	Brick	1
Conector Xadrez	Brick	1
Chapas metálicas	Tetra	1/0,5
Laje de betão na parte superior dos contornos do conector	Brick	0,5
Laje de betão nervurada	Brick and Tetra/Brick	1

4.1.6 Sequência de carregamentos e parâmetros de solução

O histórico de carregamentos consiste na introdução de incrementos de carga e cada incremento de carga é definido a partir da combinação de 1 ou mais casos de carga. A cada incremento de carga é atribuído um parâmetro de solução, o qual define o método de análise não-linear utilizado para resolver o problema, tendo em conta as condições de apoio e carregamento impostas.

Como mostra a Figura 4.29, no histórico de carregamentos podem-se alterar os casos de carga multiplicando-os por um determinado fator (0,01×50). Deste modo, podemos ter incrementos de carga com deslocamentos incrementais diferentes, com o intuito de melhorar a configuração da curva força-deslocamentos e sem necessidade de analisar todos os incrementos de carga desde início, ou seja, podemos recomeçar a análise no incremento de carga em que tínhamos parado anteriormente.

Analysis steps	Load cases		Construction case	Parameters analysis	Coefficient [-]
	Number				
1	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000
2	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000
3	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000
4	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000
5	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000
6	1-2		(1) Construction case 1	Ensaio flexão viga mista, Newton-Raphson	50,000

Figura 4.29 - Histórico de carregamentos apresentado pelos vários incrementos de carga no programa de cálculo ATENA 3D.

Os métodos de análise não-linear considerados no *Software ATENA 3D* são de dois tipos: o método de *Newton-Raphson* e o método de *Arc length*. O método de *Newton-Raphson* mantém o incremento de carga até que se atinja o equilíbrio dentro da tolerância previamente estabelecida. Este método deve ser utilizado para os casos em que os valores das cargas sejam exatamente cumpridos, ou seja, para os casos de carga como *Body forces*; *Temperature*, *Shrinkage* e *Pre-stressing*, onde os valores não sofrem alterações. No entanto, este método não deve ser implementado em análises de cargas máximas, ou seja, no ramo descendente da curva. Na Figura 4.30 são apresentadas as condições de convergência associadas a este método.

O método de *Arc length* mantém a solução constante e itera os incrementos de deslocamentos e forças, ou seja, ele altera tanto os deslocamentos como as forças. É um método mais geral que o método de *Newton-Raphson*, mas não deve ser usado em problemas cujos valor não podem sofrer alterações, como por exemplo *Body forces*; *Temperature*, *Shrinkage* e *Pre-stressing* (Červenka & Procházková, 2014). Deste modo, este método pode e deve ser usado no ramo descendente da curva, quando se analisa as cargas máximas. As condições de convergência associadas a este método encontram-se representadas na Figura 4.31.

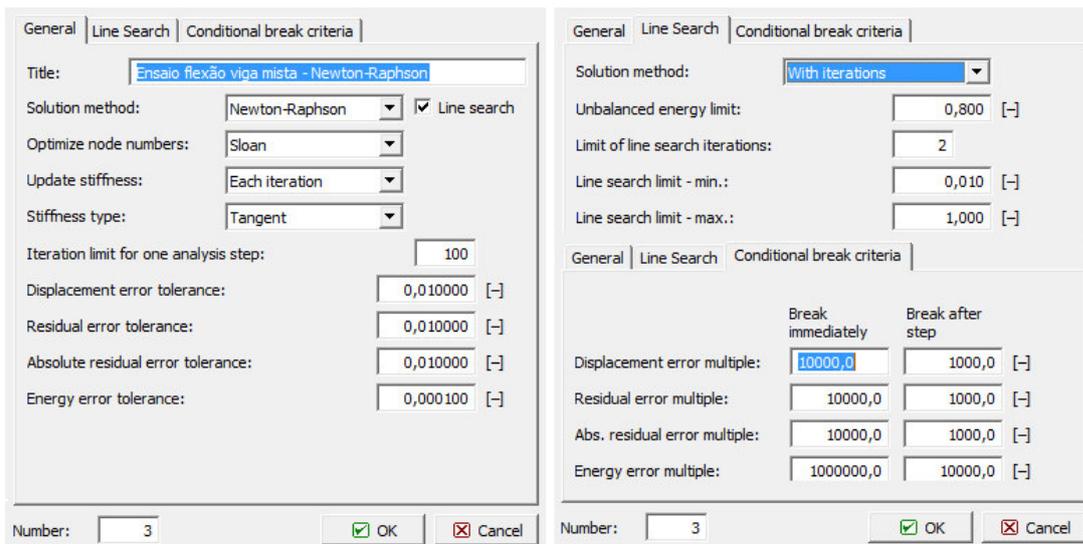


Figura 4.30 - Condições de convergência associadas ao método de *Newton-Raphson*.

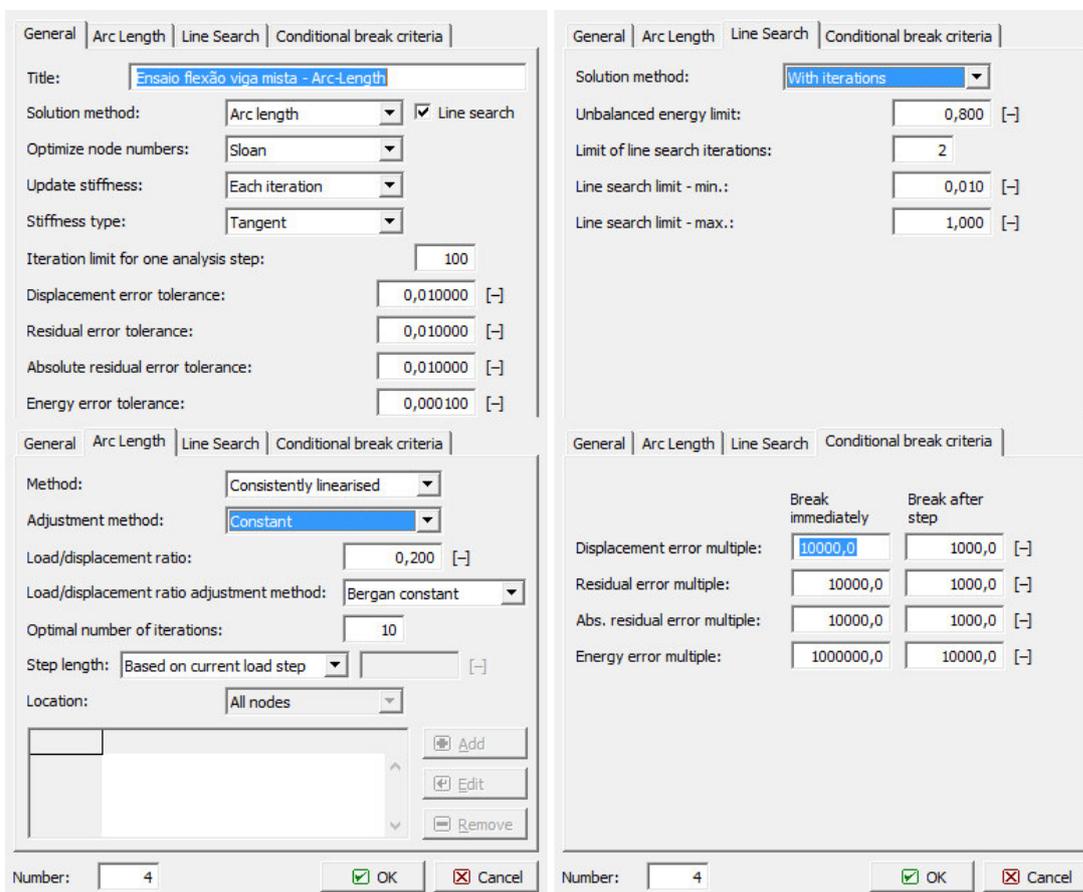


Figura 4.31 - Condições de convergência associadas ao método de *Arc length*.

Para a análise da viga mista, vão ser utilizados ambos os métodos. Na primeira fase de carregamento, ou seja, na fase linear da curva força-deslocamento será utilizado o método de *Newton-Raphson* e a partir dessa fase será utilizado o método de *Arc length*.

4.1.7 Pontos de monitorização

Os pontos de monitorização servem para medir forças, deslocamentos e tensões ou extensões, registando os resultados calculados durante a análise. Existem dois tipos de pontos de monitorização: pontos de monitorização nos nós e pontos de monitorização em pontos de integração. Os pontos de monitorização nos nós permitem medir forças externas, reações e deslocamentos e os pontos de monitorização em pontos de integração permitem medir tensões, deformações, tensões e deformações iniciais, pesos próprios e as características das fendas.

Para a análise da viga mista com conector do tipo Indentado e do tipo Xadrez foram utilizados pontos de monitorização nos nós, medindo-se assim, forças e deslocamentos. Estes pontos foram definidos em concordância com os pontos que virão a ser definidos nos ensaios para se obter resultados próximos dos reais. Logo, para medir os deslocamentos verticais na face inferior da viga foram definidos dois pontos de monitorização, um para medir os deslocamentos a meio vão (d_1 da Figura 4.32) e outro para medir os deslocamentos a 713,025 mm da extremidade (d_2 da Figura 4.32). Para medir a força aplicada na viga, foi adicionado um ponto de monitorização no ponto de aplicação do carregamento (r da Figura 4.32), podendo-se deste modo controlar a força aplicada a cada incremento de deslocamento imposto.

O ponto de monitorização d_2 não será para já utilizado para a análise dos resultados dos modelos numéricos, mas será mais tarde utilizado após a realização de ensaios experimentais. Nos ensaios serão medidos deslocamentos em quatro pontos (d_1 e d_2 , de cada lado da viga).

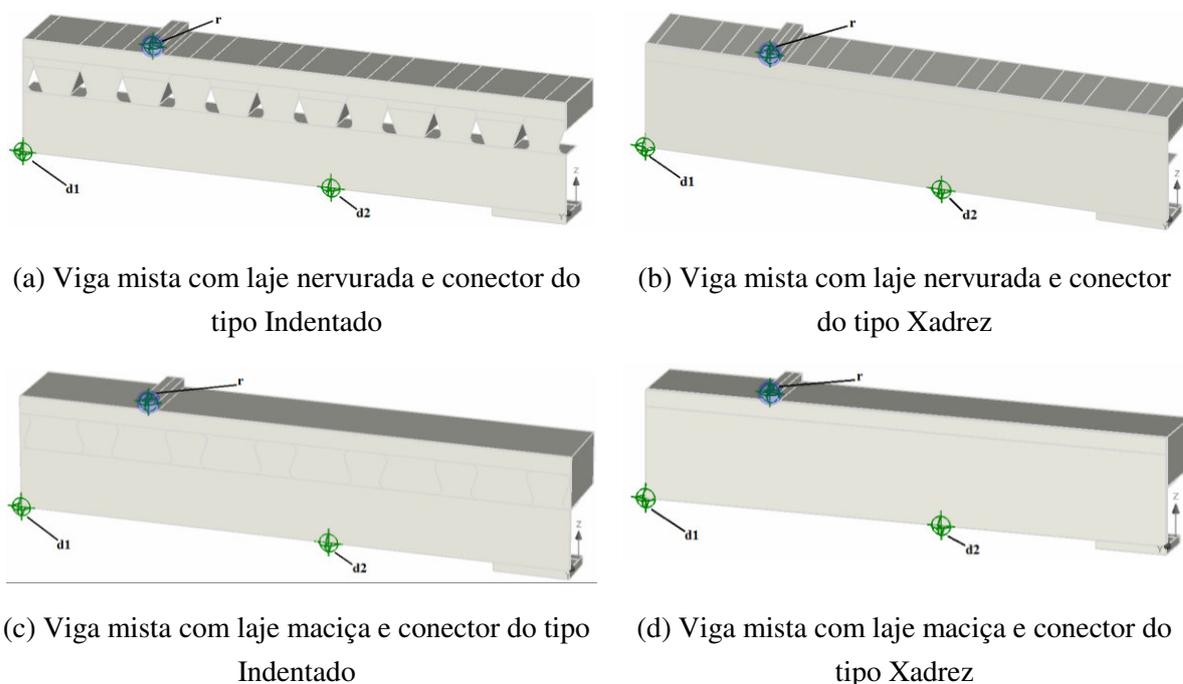


Figura 4.32 - Pontos de monitorização definidos no modelo numérico

Na Tabela 4.6 apresenta-se esquematicamente os pontos de monitorização referidos anteriormente.

Tabela 4.6 - Características impostas aos pontos de monitorização.

Parâmetro de monitorização	Designação	Posição em relação à extremidade (mm)	Macroelemento a medir	Direção
Deslocamento	d1	1256,05	Viga metálica	Z
	d2	543,025	Viga metálica	Z
Reação	r	956,05	Chapa sobre a laje de betão	Z

4.2 Análise de sensibilidade

Como já foi referido anteriormente com a análise de sensibilidade iremos tentar prever o comportamento das vigas mistas à flexão. No total, são considerados 20 modelos. Como existem parâmetro que só se podem conhecer e/ou determinar quando se realizam ensaios, teremos de estimar esses valores. Deste modo, justifica-se uma análise de sensibilidade para aferir a influência desses parâmetros no comportamento dos modelos, o que dará origem a vários modelos.

Através dos resultados, obtidos com o *Software ATENA 3D*, dos diversos modelos e posterior análise destes, efetuar-se-á uma comparação com os resultados obtidos através da Ferramenta de Cálculo, com o intuito de identificar e interpretar as tendências do comportamento estrutural dos modelos.

Os resultados foram extraídos em tabelas, para posteriormente se conciliar toda informação graficamente.

4.2.8 Modelo 1: modelo base

Este modelo foi definido de acordo com os parâmetros referidos anteriormente, para os modelos com laje nervurada e com laje maciça, e ambos os tipos de conector, Xadrez e Indentado.

4.2.8.1 Viga mista com conector do tipo Xadrez

Na Figura 4.33 e na Figura 4.34 está representada a curva que relaciona a força aplicada e a correspondente deformação vertical máxima, para os dois modelos da viga mista com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez (com laje nervurada e com laje maciça) e também os resultados obtidos com a Ferramenta de Cálculo, para cada modelo.

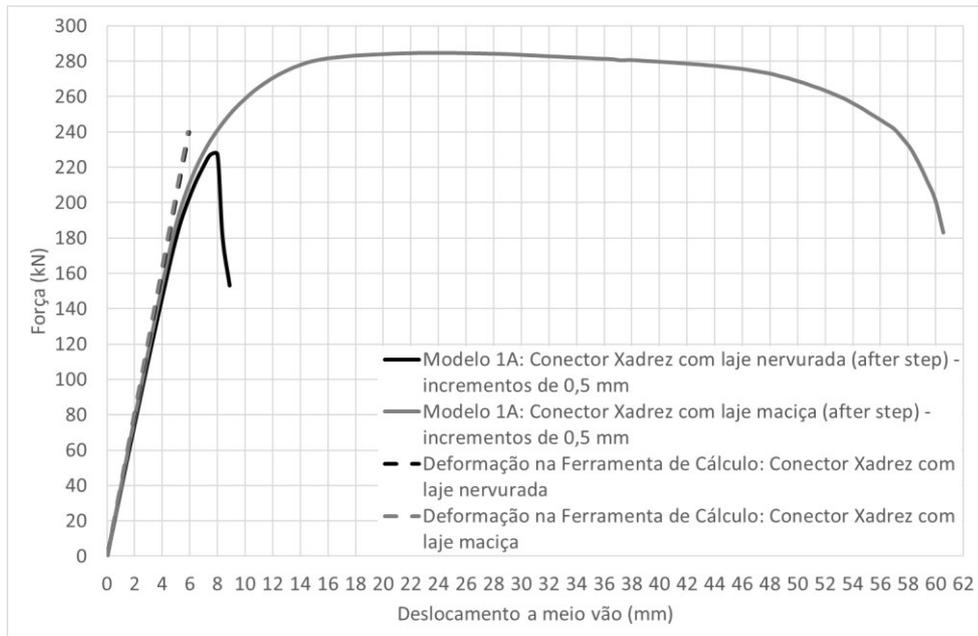


Figura 4.33 - Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.

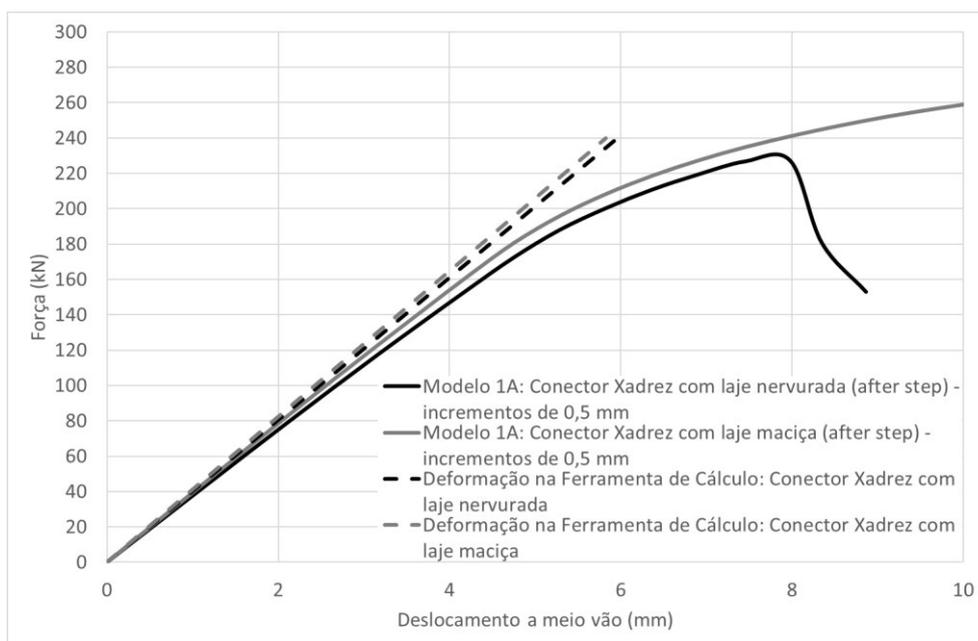


Figura 4.34 – Fase inicial da curva força-deformação a meio vão do Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.

Na fase inicial de carregamento, a rigidez dos modelos (numéricos) de laje maciça e nervurada é bastante próxima, mas o modelo de laje maciça é um pouco mais rígido do que o modelo de laje nervurada, tal como seria de esperar, visto que o modelo de laje maciça não apresenta a redução de secção correspondente às nervuras.

Após a fase elástica, os modelos apresentam comportamento diferentes. O modelo de laje nervurada apresenta capacidade de carga de aproximadamente 230 kN. O modelo de laje maciça

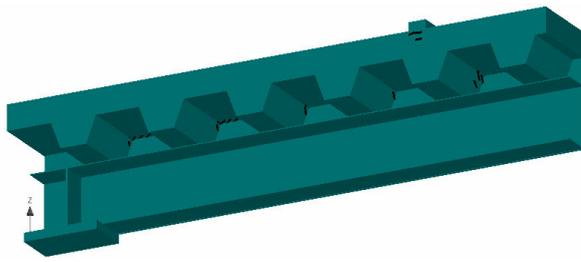
revela uma capacidade de carga superior, de aproximadamente 285 kN e também apresenta um comportamento mais dúctil, sendo capaz de desenvolver elevada deformação vertical.

Por comparação com os resultados teóricos, obtidos a partir da Ferramenta de Cálculo, pode-se constatar que estes se aproximam bastante dos resultados referentes ao modelo numérico, pois para uma carga de aproximadamente 50% da carga máxima dos modelos, temos os seguintes resultados: no modelo numérico com laje nervurada a deformação máxima a meio vão é de 3,17 mm, enquanto que na Ferramenta de Cálculo é de 2,93 mm e no modelo numérico com laje maciça a deformação vertical máxima a meio vão apresenta um valor de 3,70 mm, enquanto que na Ferramenta de Cálculo apresenta um valor de 3,47 mm. Assim sendo, comprova-se que os modelos construídos têm uma forte possibilidade de demonstrarem um comportamento próximo do real.

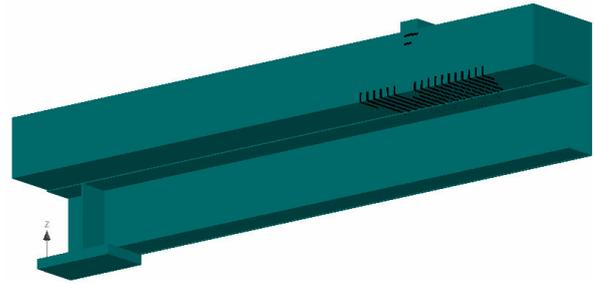
Modos de Rotura

O início de fendilhação para o modelo numérico de laje nervurada acontece para uma carga de 79,12 kN e para o modelo numérico de laje maciça acontece para uma carga de 82,92 kN (ver Figura 4.35(a)). As primeiras fendas são visíveis na parte exterior da laje de betão, e com o aumento da carga aplicada, vão surgir também na parte interior da viga mista, junto ao contorno do conector Xadrez (ver Figura 4.35(b)). Quando se atinge a carga máxima, que para o modelo de laje nervurada é aos 227,24 kN e para o modelo de laje maciça é aos 284,56 kN, as fendas já se encontram a envolver toda a laje de betão, tanto na parte interior como exterior (ver Figura 4.35(c) e ver Figura 4.35(d)). Verifica-se que no modelo de laje nervurada existe uma fendilhação que se distribui, principalmente, entre o ponto de aplicação da carga e o apoio, resultante do elevado esforço de corte no betão. No modelo de laje maciça, existe uma plastificação das secções a meio vão, devido há grande fendilhação no betão, originado nessa zona o esmagamento do betão.

Verifica-se que o modelo de laje maciça apresenta maior capacidade de carga do que o modelo de laje nervurada, tanto para o início da fendilhação como para a fase de rotura. No início da fendilhação, essa diferença é mínima, resultando apenas das diferenças de geometria do modelo, mas na fase de rotura essa diferença já é maior, devido aos diferentes modos de rotura existentes entre os dois modelos.

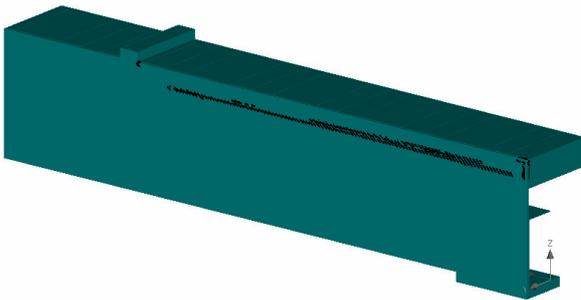


Modelo de laje nervurada ($P = 79,12 \text{ kN}$)

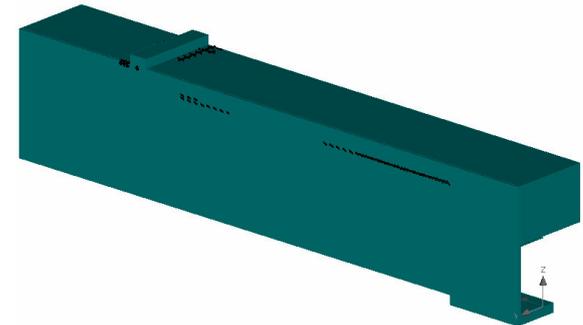


Modelo de laje maciça ($P = 82,92 \text{ kN}$)

a) Início de fendilhação.

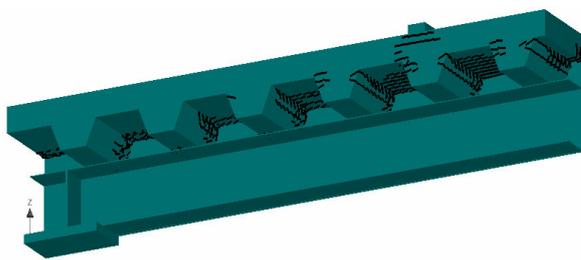


Modelo de laje nervurada ($P = 200,32 \text{ kN}$)

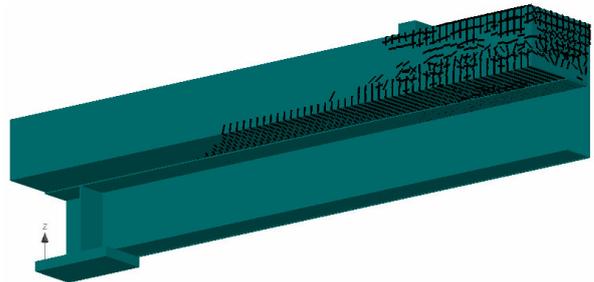


Modelo de laje maciça ($P = 195,92 \text{ kN}$)

b) Fendilhação do betão, junto ao conector.

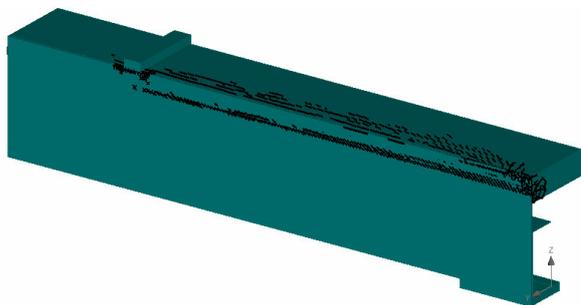


Modelo de laje nervurada ($P = 227,24 \text{ kN}$)

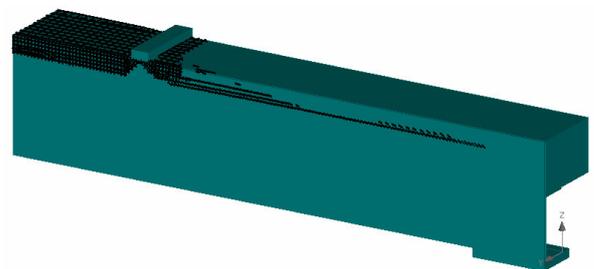


Modelo de laje maciça ($P = 284,56 \text{ kN}$)

c) Carga máxima - lado exterior.



Modelo de laje nervurada ($P = 227,24 \text{ kN}$)



Modelo de laje maciça ($P = 284,56 \text{ kN}$)

d) Carga máxima - lado interior.

Figura 4.35 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 1A: viga mista com conector do tipo Xadrez.

Tensões

Nos modelos numéricos, é possível ter conhecimento das tensões principais nos diferentes componentes, e para os diferentes níveis de carregamento definidos. Na Figura 4.36 e na Figura 4.37 são representados os diagramas das tensões principais para o patamar de carga máxima atingida nos modelos da viga mista com laje nervurada e com laje maciça. Na Figura 4.38 estão representados os mesmos diagramas para o conector Xadrez.

Observa-se uma elevada proximidade entre ambos os modelos, onde se verifica que a tensão principal máxima se situa na secção de meio vão da viga. A tensão principal máxima de compressão apresentada para o modelo numérico na laje de betão nervurada situa-se entre os 9,0 MPa e os 10,5 MPa e a tensão principal máxima de tração, na viga metálica do modelo de laje nervurada, situa-se entre os 240,0 MPa a 283,7 MPa (ver Figura 4.36 (a) e Figura 4.36(b)). Para o conector Xadrez, a tensão principal máxima de compressão situa-se ente 0 MPa e 2,7 MPa e a tensão principal máxima de tração está definida num intervalo de valores entre 220,0 MPa e 237,7 MPa (ver Figura 4.38(a)).

No modelo de laje nervurada, as tensões principais máximas de compressão no betão situam-se numa gama de valores entre 18,0 MPa e 21,0 MPa e no conector Xadrez entre 0 MPa e 4,7 MPa (ver Figura 4.37(c) e ver Figura 4.38(b)). As tensões principais máximas de tração na viga metálica apresentam valores num intervalo de 260 MPa a 304,1 MPa e no conector Xadrez valores num intervalo de 225 MPa a 242,3 MPa (ver Figura 4.37(d) e ver Figura 4.38(b)).

Os resultados obtidos no modelo de laje nervurada vão de encontro aos resultados obtidos através da Ferramenta de Cálculo, nomeadamente ao nível do eixo neutro (e.n.) plástico, pois como se pode verificar, parte da laje de betão encontra-se comprimida, bem como uma parte superior do conector Xadrez. Apesar do e.n. teórico se encontrar no banzo superior do perfil, ou seja, uma pequena parte do banzo encontra-se comprimida, no modelo não se consegue visualizar essa compressão, o que é compreensível, visto que o banzo do perfil possui uma espessura muitíssimo pequena, sendo a parte do banzo que se devia encontrar comprimida ainda mais pequena, não sendo assim detetável no modelo.

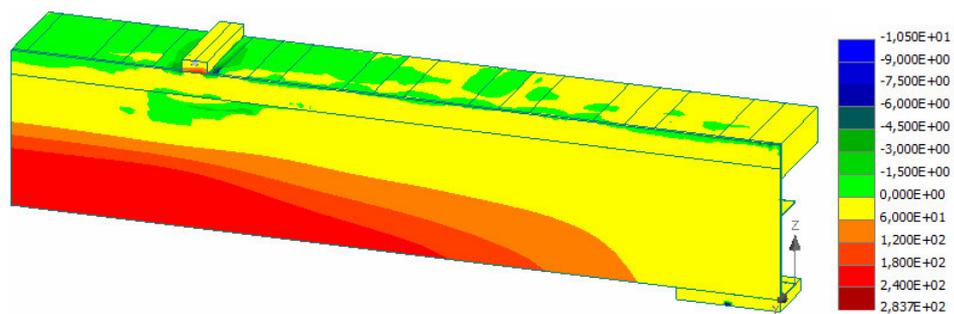
Os resultados obtidos com o modelo numérico de laje maciça também se encontram de acordo com o modelo teórico, onde o e.n. se situa na laje de betão e atravessa o conector.

Para ambos os modelos, é notório que a viga mista ainda conseguia suportar maiores deslocamentos, pois a tensão limite de compressão no betão ainda não foi atingida e a tensão limite máxima de tração no conector também ainda não foi atingida. Contudo, a viga metálica já atingiu a tensão limite máxima de tração, mas como a viga ainda não se encontra totalmente plastificada, significa que o sistema não esgotou totalmente a sua capacidade resistente, o que remete para uma possível rotura por corte na laje de betão, junto à ligação entre o conector e a laje de betão.

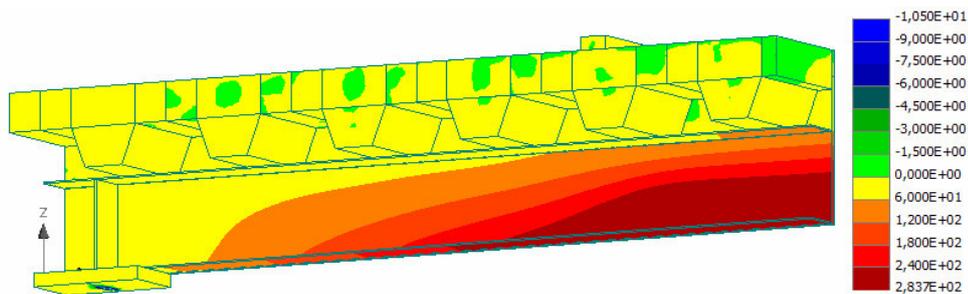
A resistência ao corte, do conector Xadrez para ambos os modelos, obtida através da Ferramenta de Cálculo, apresenta um valor de 426,12 kN, assim para o modelo com laje nervurada $g = 426,12kN \leq 441,15kN$ e para o modelo com laje maciça $g = 426,12kN \leq 864,92kN$, logo o conector Xadrez não possui resistência suficiente para suportar as forças nele aplicadas. Esta resistência é obtida considerando os valores definidos por Thomann & Lebet (2007) e considerando σ igual a 0,5 MPa, no entanto, só com a realização de ensaios é que será possível calibrar os vários parâmetros e descobrir se o valor do confinamento escolhido (σ) é o mais correto.

O modelo teórico, tal como os modelos numéricos, indica para uma possível rotura por corte na ligação entre o conector e a laje de betão.

Posto isto, analisar-se-á melhor o comportamento deste modelo, nomeadamente ao nível da conexão, através da criação de um material que permita estudar a influência da resistência ao corte e também da rigidez na interface de ligação do conector com a laje de betão. Este estudo será apresentado posteriormente.

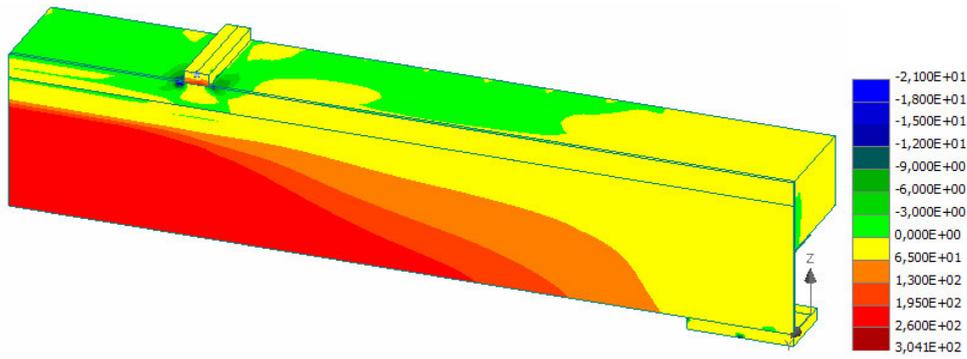


(a) Lado interior

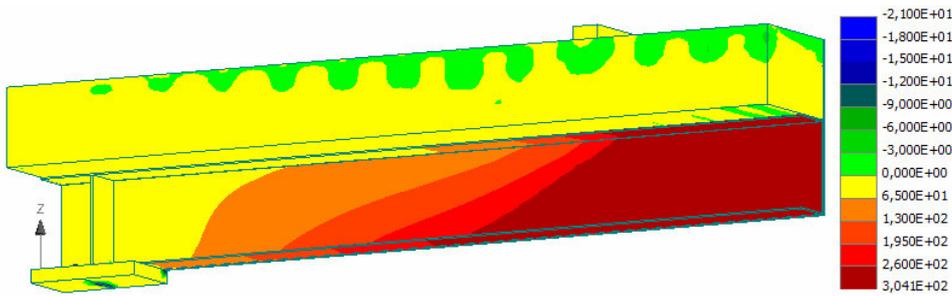


(b) Lado exterior

Figura 4.36 - Tensões Principais no Modelo 1A com laje nervurada e conector Xadrez (em MPa).

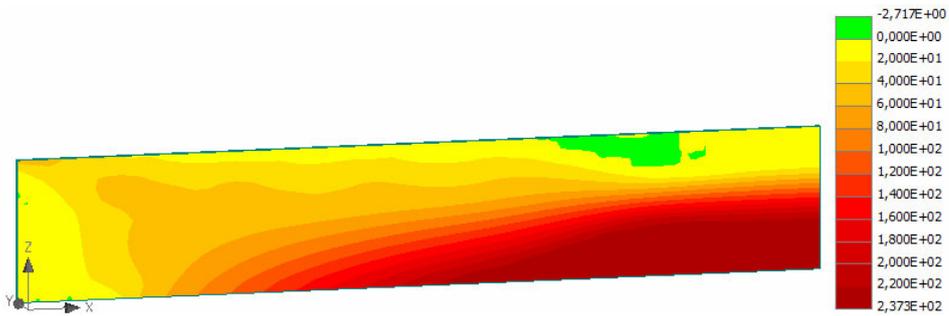


(a) Lado interior

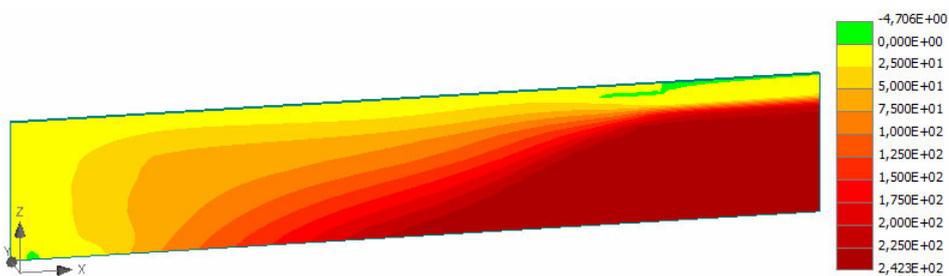


(b) Lado exterior

Figura 4.37 – Tensões Principais no Modelo 1A com laje maciça e conector Xadrez (em MPa).



(a) Conector do modelo de laje nervurada.



(b) Conector do modelo de laje maciça.

Figura 4.38 - Tensões Principais no conector Xadrez do Modelo 1A (em MPa).

4.2.8.2 Viga mista com conector do tipo Indentado

Na Figura 4.39 estão representados os comportamentos à flexão, dos modelos com conector Indentado, no caso de laje maciça e nervurada. Também na mesma figura se encontra a curva força-deslocamento a meio vão, obtida com a Ferramenta de Cálculo desenvolvida.

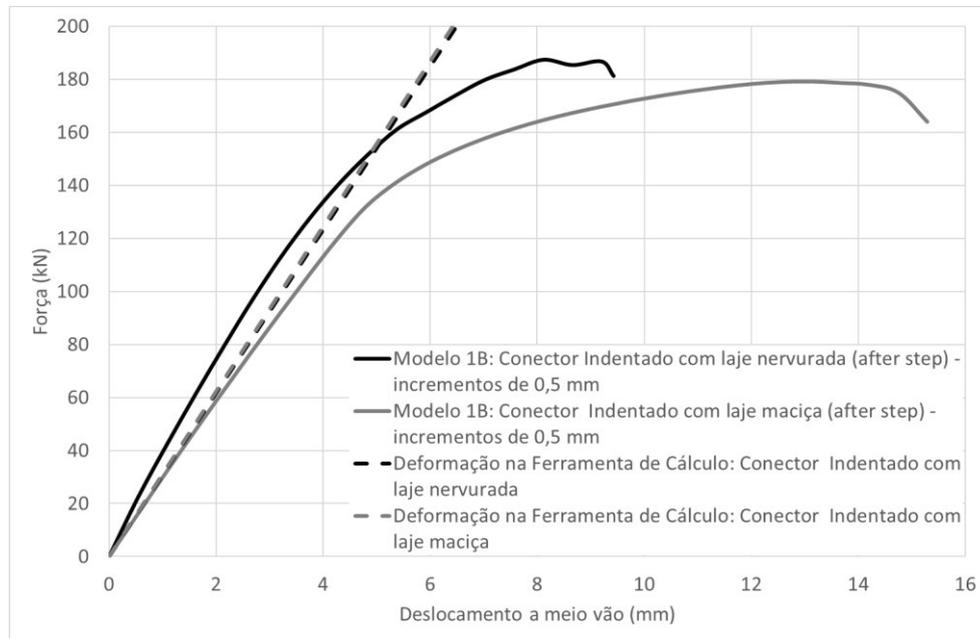


Figura 4.39 - Modelo 1B: viga mista com conector do tipo Indentado.

Como se pode verificar, a viga mista com laje nervurada e conector Indentado apresenta um comportamento mais rígido na fase inicial do que a curva força-deslocamento que resulta da ferramenta de cálculo. Este resultado é inesperado, mostrando que a resposta deste modelo não é fidedigna.

O modelo com viga de laje maciça e conector Indentado continua a apresentar um comportamento mais dúctil do que o modelo de laje nervurada, à semelhança do que se tinha observado anteriormente nos modelos com conector do tipo Xadrez.

Observa-se ainda que o modelo teórico de laje maciça tem uma rigidez inicial bastante próxima da rigidez do correspondente modelo numérico.

Assim, com o objetivo de melhorar a resposta dos modelos que simulam o comportamento da viga mista com laje nervurada e conector Indentado, serão efetuados outros dois modelos, onde se irão modificar as ligações entre as superfícies de contacto da laje e do conector Indentado.

4.2.9 Modelo 2 e Modelo 3: modelo base com conector Indentado + alteração das superfícies de contacto entre o conector Indentado e a laje de betão

Estes modelos têm por objetivo o aperfeiçoamento da resposta dos modelos base com conector Indentado, analisados anteriormente. Para tal, as ligações entre a laje de betão e o conector

Indentado serão alteradas de modo a que o comportamento da laje nervurada seja mais mais próximo do seu comportamento real.

Na Figura 4.40 e na Figura 4.41 estão representadas os tipos de ligações, entre a laje de betão e o conector Indentado, que foram utilizadas no Modelo 2. As ligações existentes entre a laje de betão e conector do Modelo 3, encontram-se representadas na Figura 4.42 e na Figura 4.43. Neste caso, vão existir menos ligações rígidas entre os dois elementos, contrariamente ao Modelo 2.

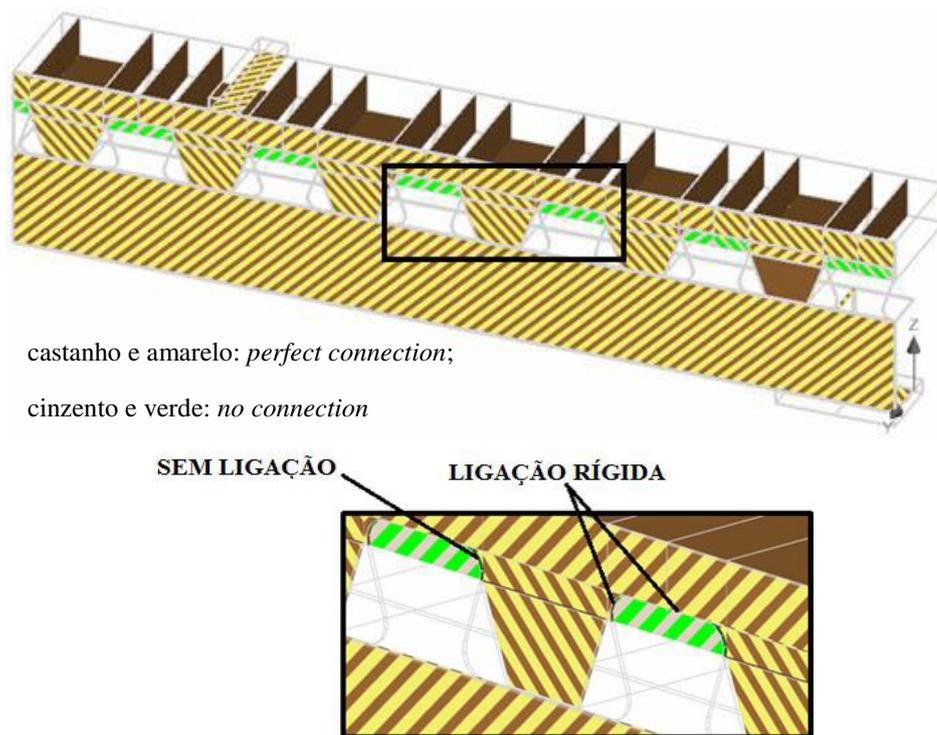


Figura 4.40 - Superfícies de contacto do Modelo 2, para a viga mista de laje nervurada com conector Indentado.

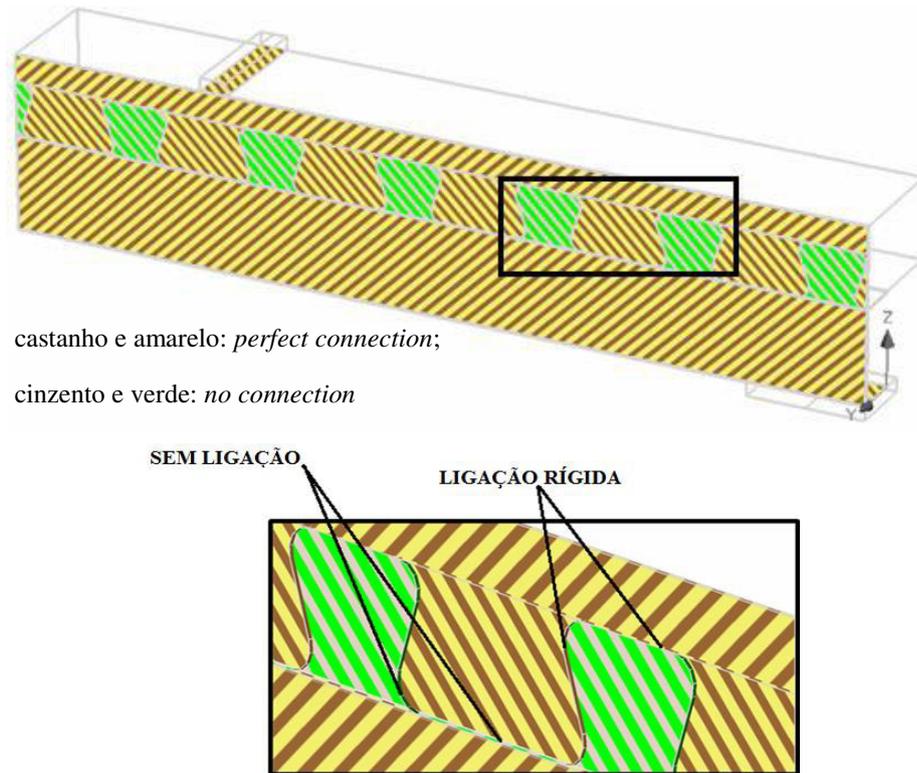


Figura 4.41 - Superfícies de contacto do Modelo 2, para a viga mista de laje maciça com conector Indentado.

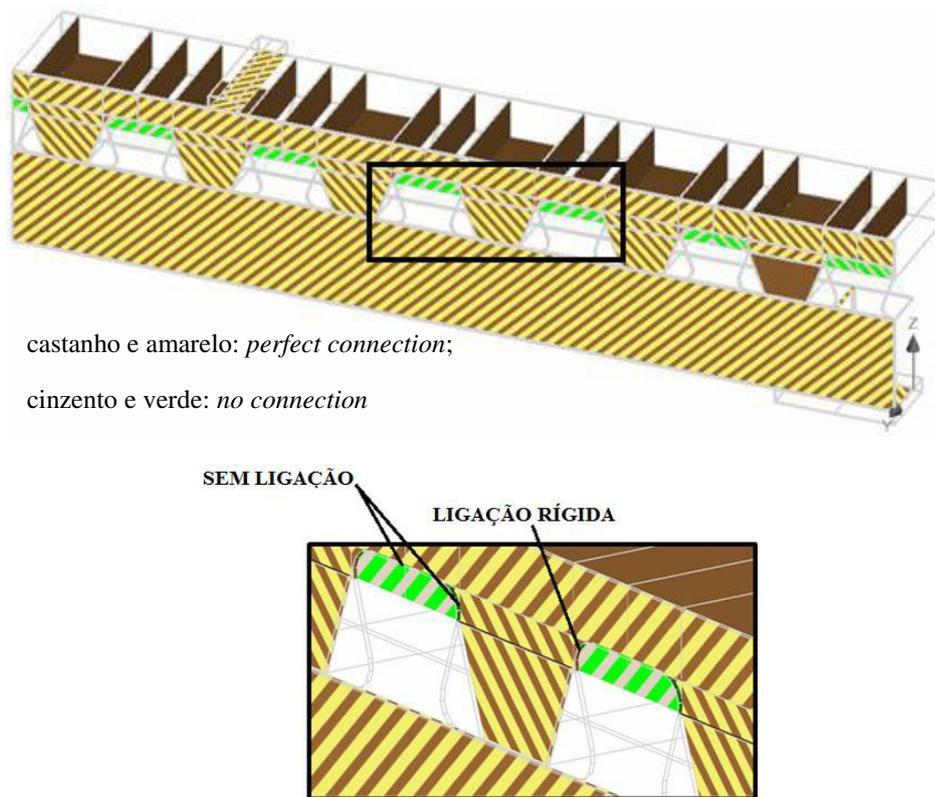


Figura 4.42 - Superfícies de contacto do Modelo 3, para a viga mista de laje nervurada com conector Indentado.

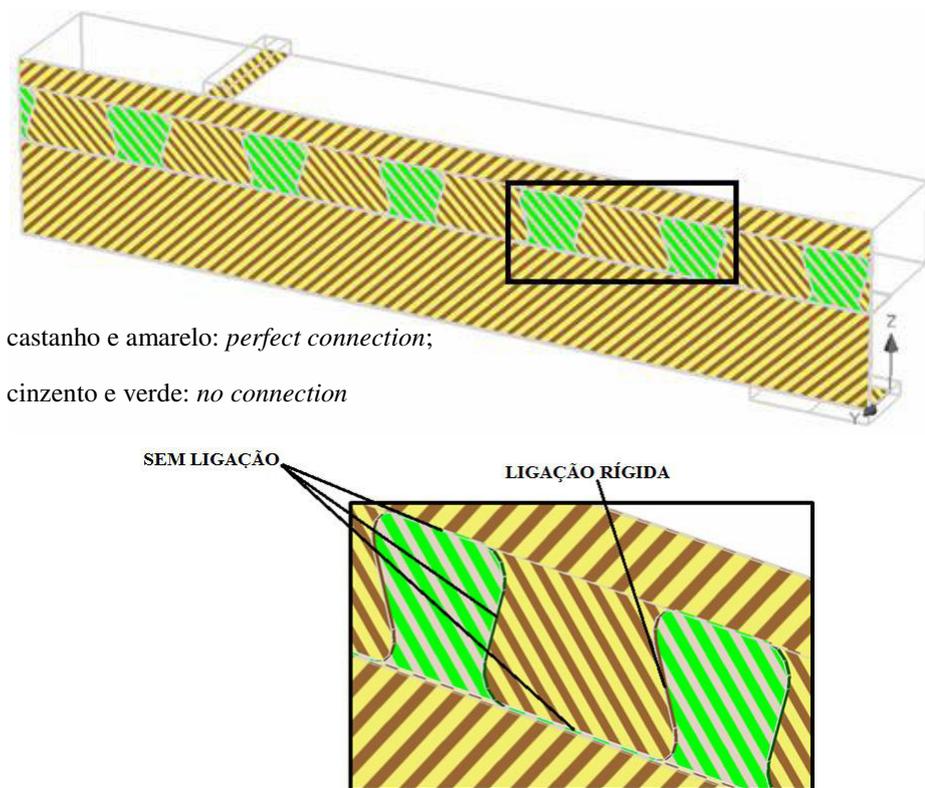


Figura 4.43 - Superfícies de contacto do Modelo 3, para a viga mista de laje maciça com conector Indentado.

4.2.9.1 Modelo 2 com laje nervurada e com laje maciça

Na Figura 4.44 está representado o gráfico força-deslocamento, após realizada a análise do modelo com as alterações efetuadas ao nível das ligações da laje e do conector, correspondentes ao Modelo 2.

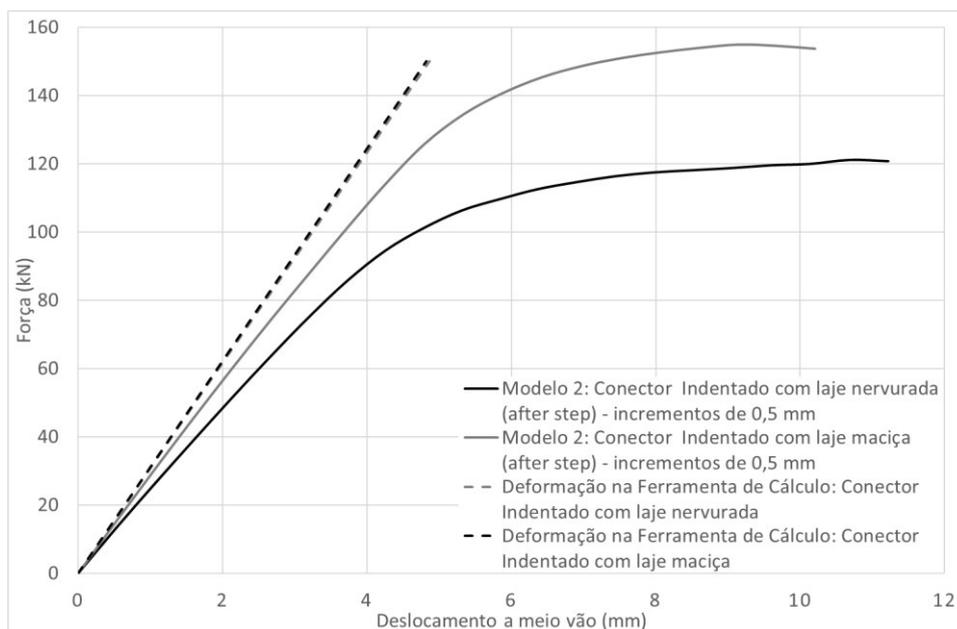


Figura 4.44 - Modelo 2: viga mista com conector do tipo Indentado.

Como se pode verificar por este gráfico, os modelos da viga mista com conector Indentado apresentam um comportamento mais próximo do que seria expectável, pois ambos apresentam um comportamento menos rígido do que a resposta obtida com a ferramenta de cálculo. Também neste caso, a viga mista com laje nervurada assume um comportamento menos rígido e com capacidade resistente inferior ao da viga mista com laje maciça.

Existe uma diferença de rigidez entre as duas vigas, nervurada e maciça, bem como uma diferença de carga máxima, ou seja, a viga mista com laje maciça apresenta uma maior capacidade de carga do que a viga mista de laje nervurada. Isto deve-se à maior área de contacto entre o conector Indentado e a laje de betão no caso da laje maciça.

Observa-se que o comportamento dos modelos numéricos se afasta do comportamento dos modelos teóricos, o que se pode considerar razoável visto que agora a ligação entre a laje de betão e o conector já não é totalmente rígida.

Verifica-se que a capacidade de carga destes modelos comparativamente aos modelos base com conector Indentado, diminuiu. Este resultado é razoável, visto que a ligação entre a laje de betão e o conector Indentado deixou de ser totalmente rígida.

Contudo, e contrariamente ao verificado nos modelos base com conector Xadrez e também com conector Indentado, neste caso, ambas as vigas, maciça e nervurada, possuem um comportamento igualmente dúctil até atingir a carga máxima.

Modos de Rotura

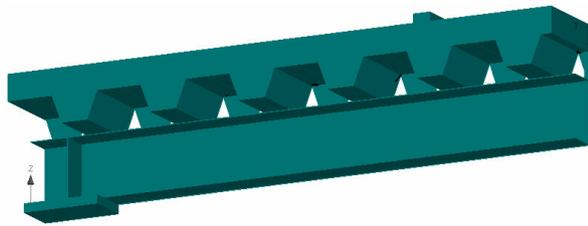
A carga aplicada no modelo de laje nervurada para o início da fendilhação é de 13,45 kN e no modelo de laje maciça é de 45,56 kN.

O início da fendilhação é mais notório no modelo de laje maciça, pois no seu lado exterior existe um maior número de fendas (ver Figura 4.45(a)), localizadas na face inferior da laje de betão e estendendo-se no meio vão entre pontos de aplicação da carga. Do lado interior, as fendas começam a surgir na laje de betão pelos contornos do conector Indentado, sendo deste lado mais visível o surgimento de fendas. Estas fendas surgem principalmente na zona inferior do conector, no betão que está posicionado entre os dentes do conector e “encostado” a estes (ver Figura 4.45(b)). No modelo com laje nervurada, estas fendas surgem numa zona mais próxima da parte superior dos dentes do conector. Nesta fase, não se observam fendas transversais na face inferior da laje de betão, tal como acontece com a viga com laje maciça.

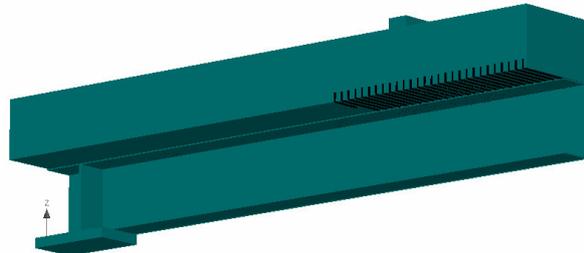
A rotura da viga mista no modelo de laje nervurada acontece para um carregamento igual a 121,12 kN e no modelo de laje maciça acontece para uma carga de 154,84 kN (ver Figura 4.45(d) e ver Figura 4.45(e)).

De um modo geral, as fendas vão progredindo na laje de betão desde os contornos do conector Indentado até ao lado exterior da laje (ver Figura 4.45(c)).

Observa-se ainda que na parte exterior do modelo de laje maciça, as fendas se situam apenas na parte central da viga mista, ou seja, perto do ponto de aplicação de carga, enquanto que no modelo de laje nervurada as fendas progredem em todo o comprimento da viga.

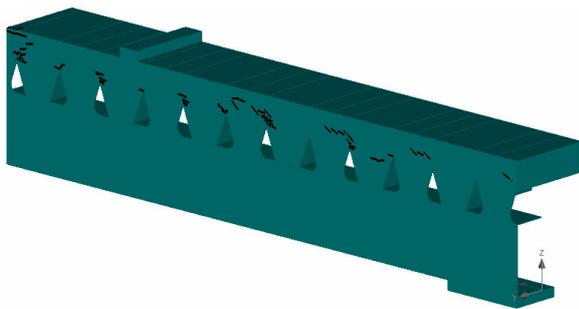


Modelo de laje nervurada ($P = 13,45 \text{ kN}$)

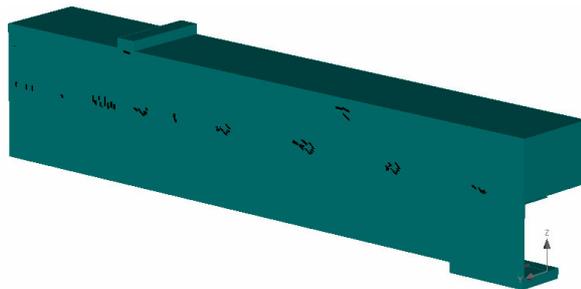


Modelo de laje maciça ($P = 45,56 \text{ kN}$)

a) Início de fendilhação – lado exterior.

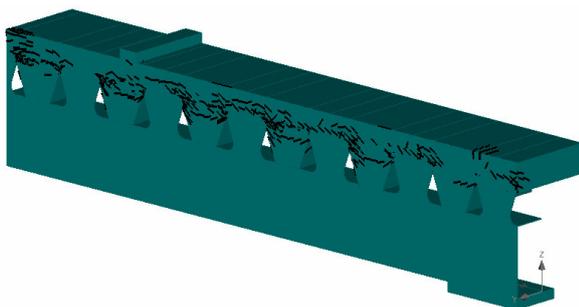


Modelo de laje nervurada ($P = 13,45 \text{ kN}$)

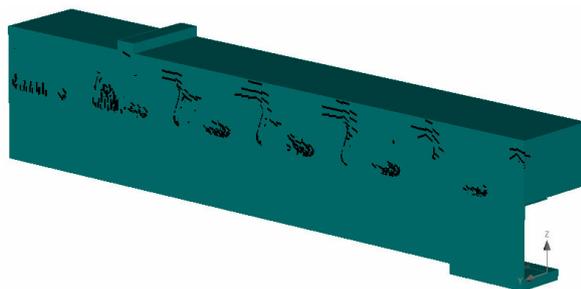


Modelo de laje maciça ($P = 45,56 \text{ kN}$)

b) Início de fendilhação – lado interior.



Modelo de laje nervurada ($P = 63,52 \text{ kN}$)



Modelo de laje maciça ($P = 134,40 \text{ kN}$)

c) Fendilhação do betão, junto ao conector.

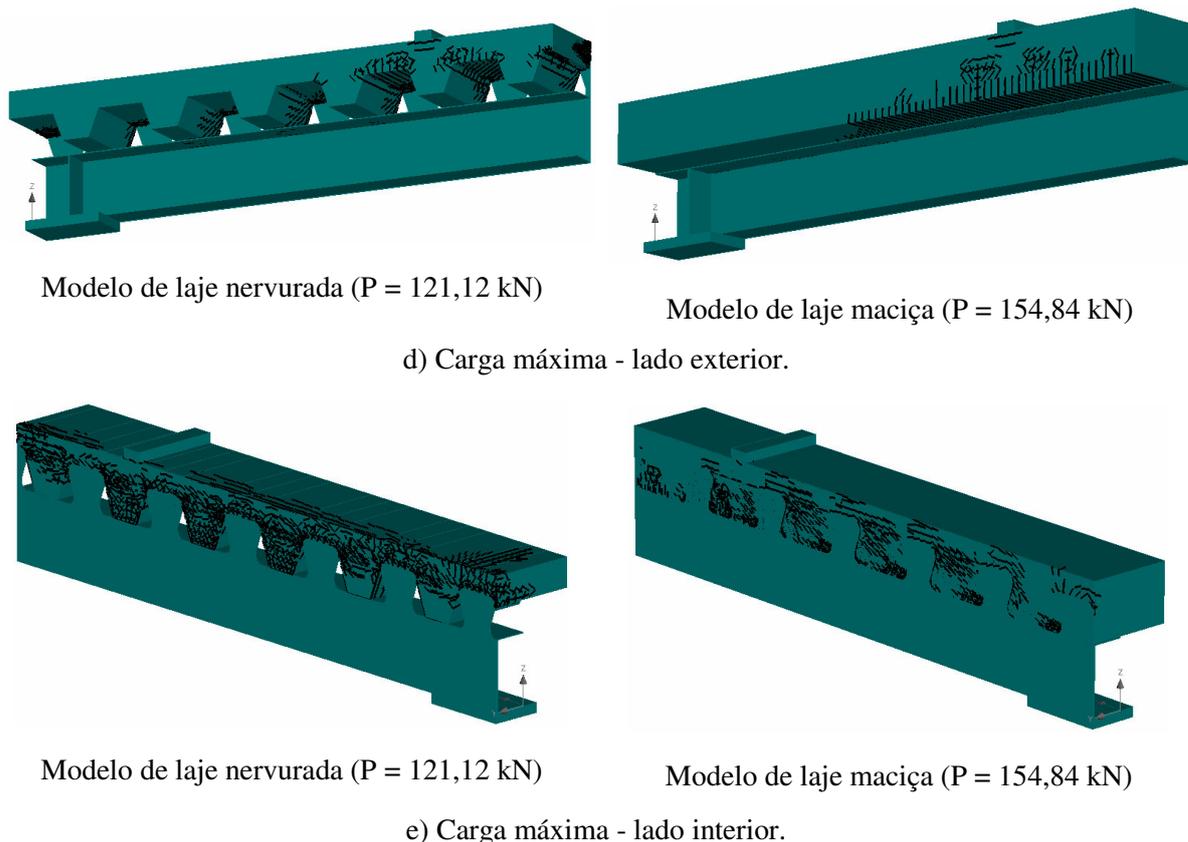


Figura 4.45 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 2 com conector do tipo Indentado.

Tensões

Na Figura 4.46 e na Figura 4.47 é possível observar o diagrama das tensões principais nos vários componentes da viga mista, para o nível de carga máxima atingida nos dois modelos das vigas mistas com conector do tipo Indentado e na Figura 4.48 é possível visualizar esse diagrama, mas apenas para o conector Indentado.

Verifica-se que no modelo de laje nervurada, as tensões principais máximas de compressão para a laje de betão situam-se entre os valores de 7,2 MPa e 8,4 MPa e as tensões principais máximas de tração, para a viga metálica situam-se entre 240 MPa e 320 MPa (ver Figura 4.46(a) e ver Figura 4.46(b)). Para o conector Indentado as tensões principais máximas de compressão apresentam valores no intervalo de 260 MPa a 272,6 MPa e as tensões principais máximas de tração situam-se entre 390 MPa e 426,8 MPa (ver Figura 4.48(a)).

No modelo de laje maciça, as tensões principais máximas de compressão para a laje de betão situam-se entre os valores de 4 MPa e 5 MPa e para o conector Indentado situam-se entre os valores de 510 MPa e 566 MPa (ver Figura 4.47 (a) e ver Figura 4.48(b)). As tensões principais máximas de tração para a viga metálica situam-se entre 240 MPa e 300 MPa e para o conector Indentado situam-se entre 340 MPa e 370,7 MPa (ver Figura 4.47 (b) e ver Figura 4.48(b)).

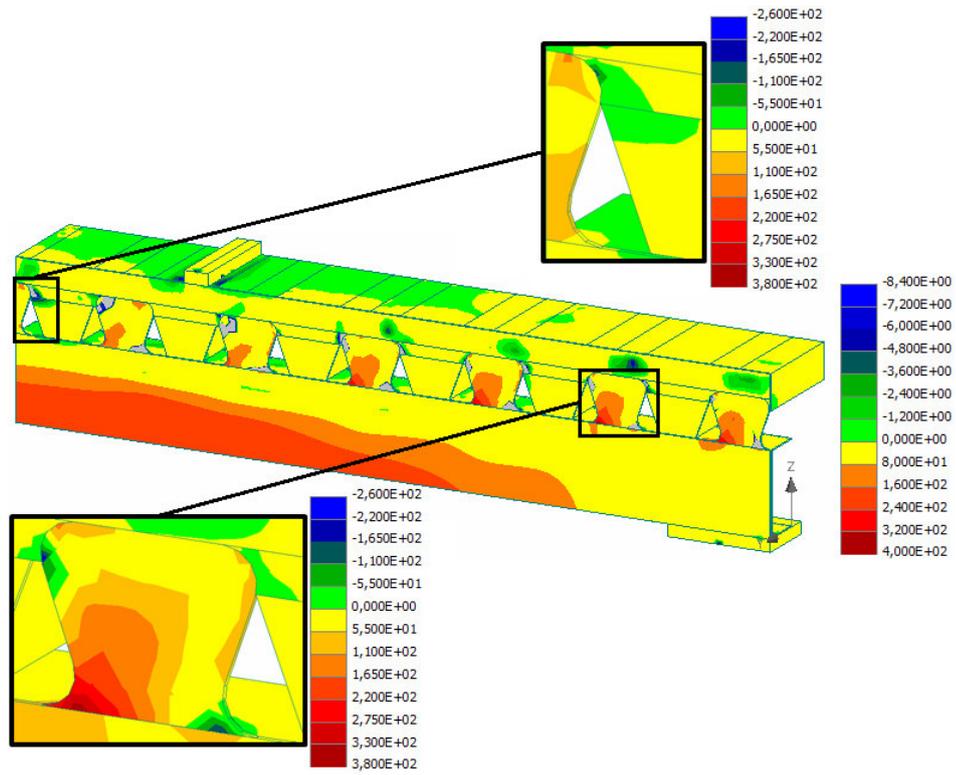
De um modo geral, observa-se que o modelo de laje nervurada apresenta tensões principais superiores às do modelo de laje maciça, com a exceção das tensões de compressão nos dentes do conector, que no modelo de laje maciça se apresentam mais elevadas.

Note-se que, como se previu nos cálculos realizados com a Ferramenta de Cálculo, o modelo de laje nervurada apresenta um e.n plástico posicionado no banzo superior no perfil e que no modelo de laje maciça o e.n. plástico se situa na laje de betão. No modelo de laje maciça, As tensões principais máximas de tração na parte superior da viga metálica possuem valores mais elevados do que as tensões principais máximas de tração no modelo de laje nervurada.

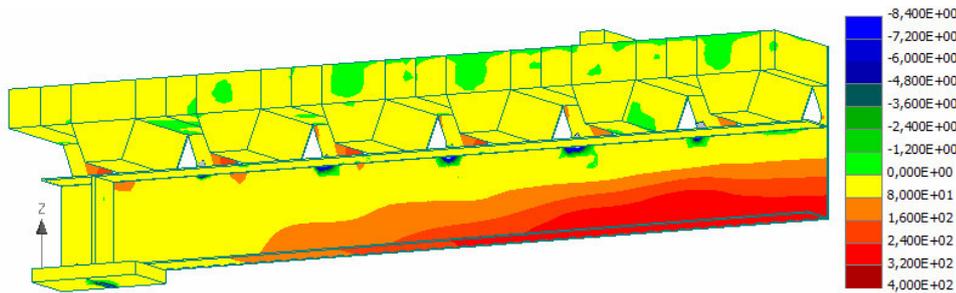
Como se pode visualizar em ambos os modelos, a tensão de limite de compressão no betão não chega a ser atingida, o que significa que a rotura não foi devida ao esmagamento do betão. Na viga metálica, a tensão de limite de tração foi ultrapassada na parte inferior da viga, nomeadamente a meio vão, contudo, esta não se encontra totalmente plastificada, o que significa que ainda conseguia suportar uma maior capacidade de carga. A tensão de limite de tração para o conector Indentado também foi ultrapassada e de facto a rotura parece ser devida aos dentes do conector, pois com a flexão da viga, o betão vai deslocando no sentido dos apoios, forçando os dentes do conector a fletir. Assim, os dentes do conector ficam com zonas de compressão de um lado (lado do apoio) e com zonas de tração do outro (lado do ponto de aplicação de carga), onde após exceder a tensão limite de tração vão plastificar.

Através da Ferramenta de Cálculo, os valores da resistência ao corte obtidos foram de 683,19 kN, utilizando os coeficientes e a equação desenvolvida por Veríssimo (2007), e de 563,90 kN, utilizando os coeficientes de regressão e a equação desenvolvida por Vieira (2009). Assim para o modelo com laje nervurada $q = 683,19kN \geq 446,25kN$ e $q = 563,90kN \geq 446,25kN$ e para o modelo de laje maciça $q = 683,19kN \geq 481,04kN$ e $q = 563,90kN \geq 481,04kN$, logo o conector Indentado possui resistência suficiente para suportar as forças nele aplicadas.

O modelo teórico para o caso do cálculo da resistência ao corte do conector Indentado, não se mostra coerente com os resultados dos modelos numéricos aqui apresentados. Todavia, esta incoerência é aceitável, pois as duas equações utilizadas foram validadas para conectores com uma espessura bastante superior ao do caso de estudo presente. Deste modo, apenas com a realização de ensaios é que será possível calibrar os coeficientes das equações, de tal forma que os resultados teóricos se apresentem de acordo com os modelos numéricos.

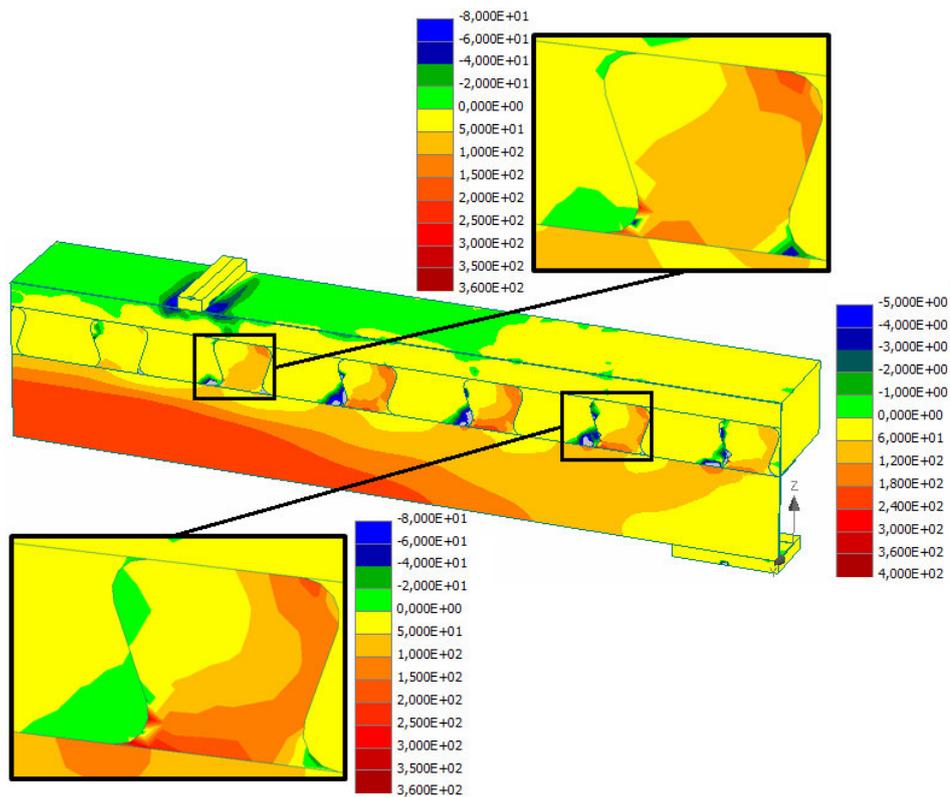


(a) Lado interior

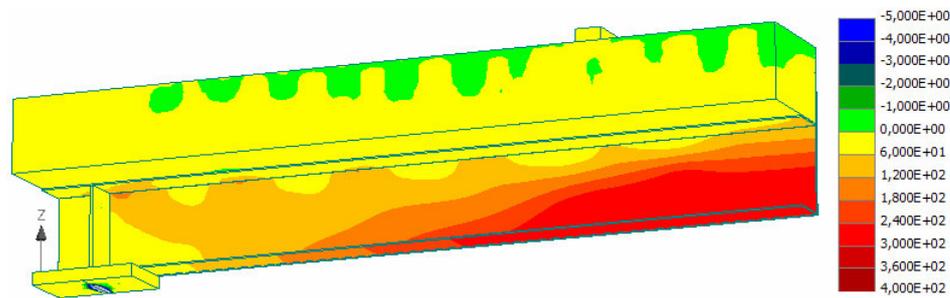


(b) Lado exterior

Figura 4.46 - Tensões Principais no Modelo 2 com laje nervurada e conector Indentado (em MPa).

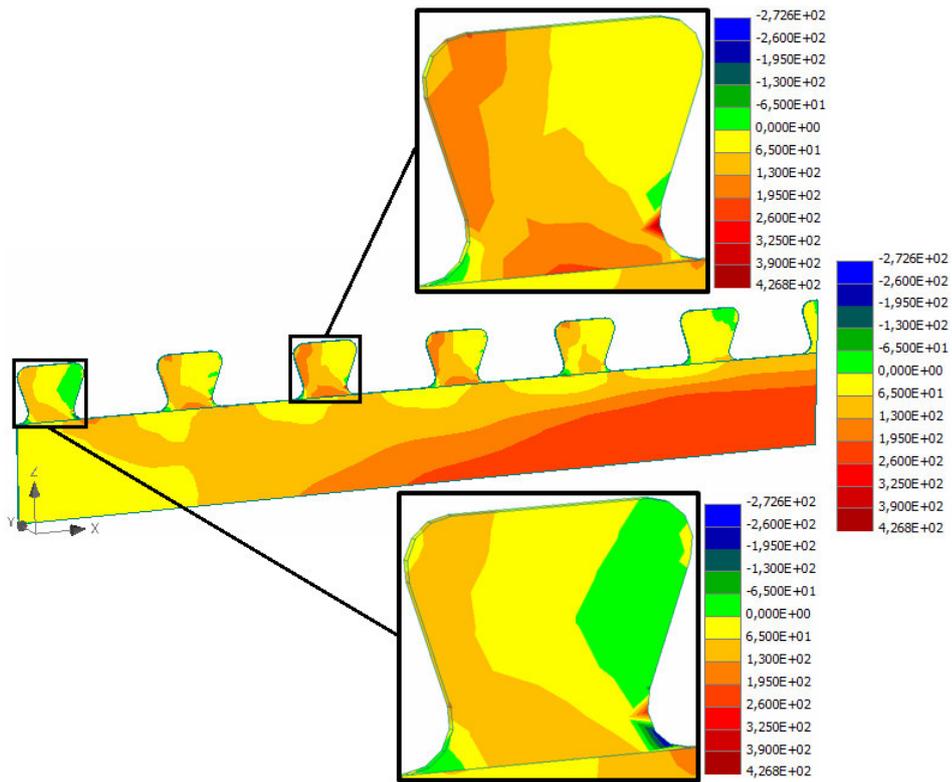


(a) Lado interior

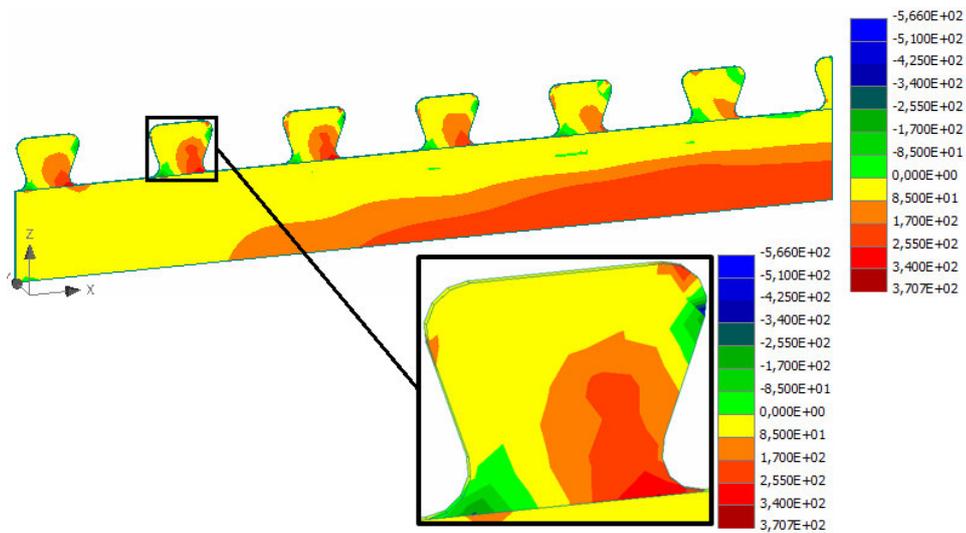


(b) Lado exterior

Figura 4.47 – Tensões Principais no Modelo 2 com laje maciça e conector Indentado (em MPa).



(a) Conector do modelo de laje nervurada.



(b) Conector do modelo de laje maciça.

Figura 4.48 - Tensões Principais no conector Indentado do Modelo 2 (em MPa).

4.2.9.2 Modelo 3 com laje nervurada e com laje maciça

Na Figura 4.49 está representado o gráfico força-deslocamentos com os resultados dos modelos, analisados à flexão.

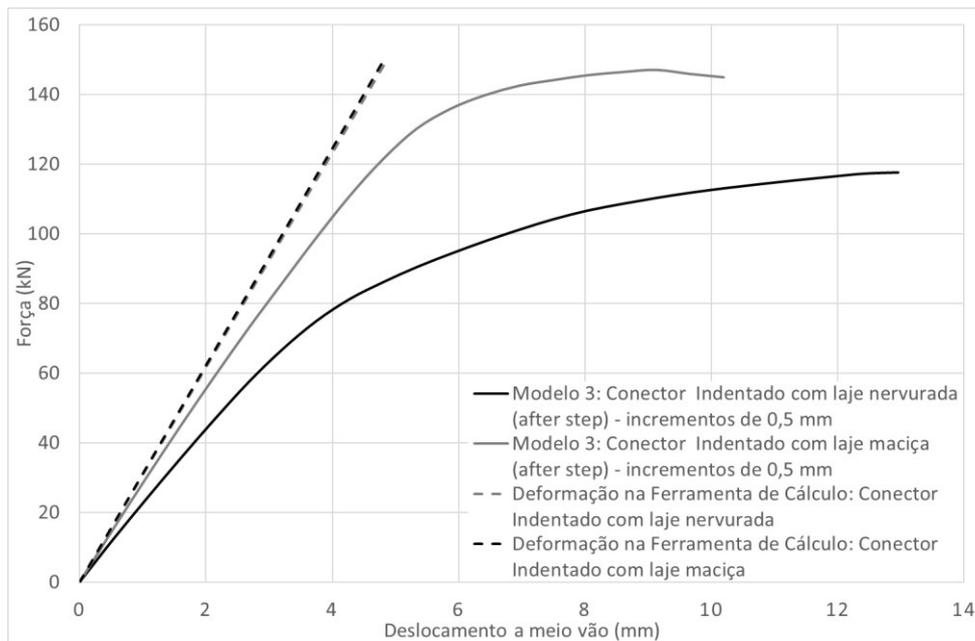


Figura 4.49 - Modelo 3: viga mista com conector do tipo Indentado.

A partir do gráfico pode-se concluir que neste caso, como também no anterior (Modelo 2), o modelo com conector Indentado de laje nervurada apresenta uma curva de força-deslocamento que se aproxima do expectável, tanto ao nível da rigidez como da capacidade de carga.

Após o início da plastificação, nota-se que os modelos apresentam boa ductilidade. No entanto, o comportamento da laje nervurada é um pouco mais dúctil, o que também já se verificou no Modelo 2.

Verifica-se que também neste modelo existe um ligeiro afastamento entre os modelos numéricos relativamente e os modelos teóricos. Como já foi explicado no Modelo 2, esta diferença de rigidez é normal, tendo em conta o menor número de ligações entre a laje de betão e o conector no modelo numérico.

O Modelo 3 apresenta uma maior diferença de rigidez entre os modelos numéricos e os modelos teóricos, o que é considerado normal, visto que este modelo possui menos ligações entre a laje de betão e o conector metálico do que o Modelo 2.

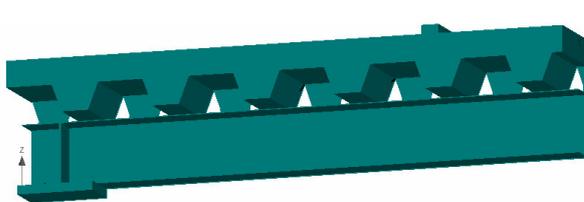
Comparativamente com o Modelo 2, este modelo também apresenta menor capacidade de carga, o que era de esperar visto que se diminuiu o número de ligações rígidas entre os elementos.

Podemos assim concluir que com estes dois modelos (Modelo 2 e Modelo 3), já temos um comportamento adequado da viga mista e que é representativo do seu comportamento real. No entanto, só com a realização de ensaios é que será possível calibrar corretamente estes modelos.

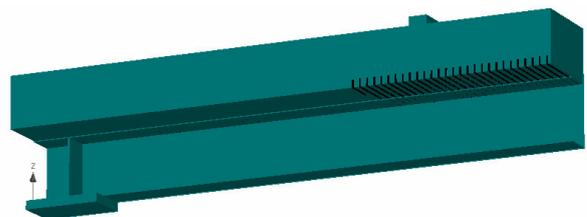
Modos de Rotura

O início de fendilhação para o modelo numérico de laje nervurada acontece para uma carga de 12,38 kN e para o modelo numérico de laje maciça acontece para uma carga de 44,92 kN (ver Figura 4.50(a) e ver Figura 4.50(b)). As primeiras fendas são visíveis na laje de betão tanto na parte interior como na parte exterior e seguem padrões muito semelhantes aos que foram observados no Modelo 2. Com o aumento da carga, as fendas vão progredindo na parte interior da viga mista, ao longo do contorno do conector Xadrez (ver Figura 4.50(c)). Quando se atinge e carga máxima, que para o modelo de laje nervurada é aos 117,64 kN e para o modelo de laje maciça é aos 147,04 kN, as fendas já se encontram a envolver toda a laje de betão, tanto na parte interior como exterior (ver Figura 4.50(d) e ver Figura 4.50(e)). No entanto, verifica-se que no modelo de laje nervurada as fendas se alargam por toda a viga mista, desde o ponto de aplicação de carga até ao apoio. No modelo de laje maciça, estas fendas visíveis do lado exterior, situam-se apenas na parte central da viga mista, entre pontos de aplicação de carga.

Pode-se concluir que os modelos com laje maciça vão sempre apresentar uma maior capacidade carga que os modelos com laje nervurada, tanto em fase de rotura, como durante o surgimento das primeiras fendas.

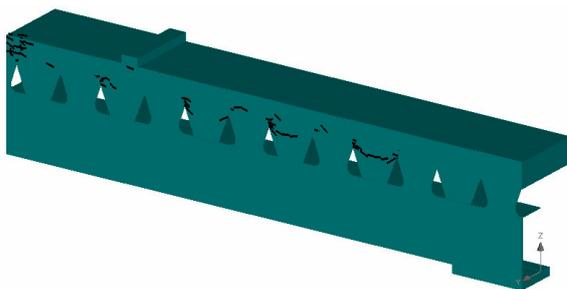


Modelo de laje nervurada (P = 12,38 kN)

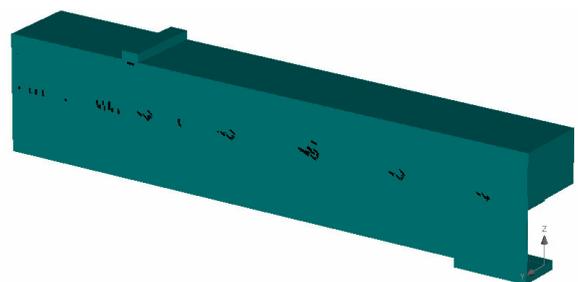


Modelo de laje maciça (P = 44,92 kN)

a) Início de fendilhação – lado exterior.

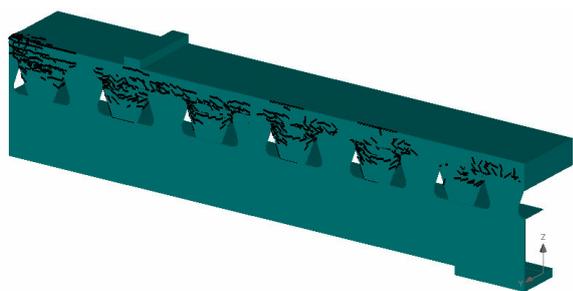


Modelo de laje nervurada (P = 12,38 kN)

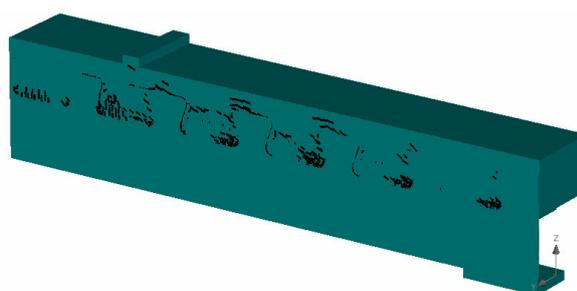


Modelo de laje maciça (P = 44,92 kN)

b) Início de fendilhação – lado interior.

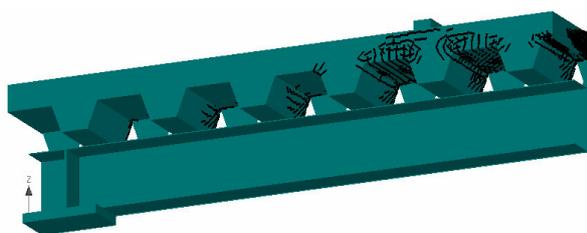


Modelo de laje nervurada ($P = 90,56 \text{ kN}$)

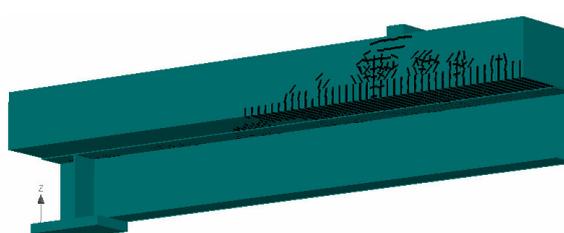


Modelo de laje maciça ($P = 130,12 \text{ kN}$)

c) Fendilhação do betão, junto ao conector.

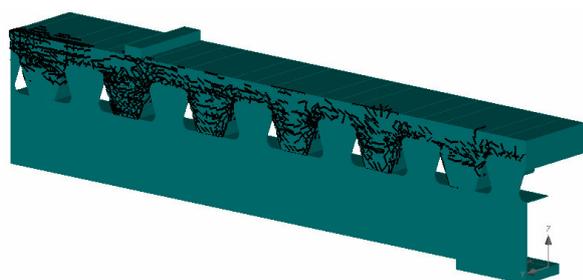


Modelo de laje nervurada ($P = 117,64 \text{ kN}$)

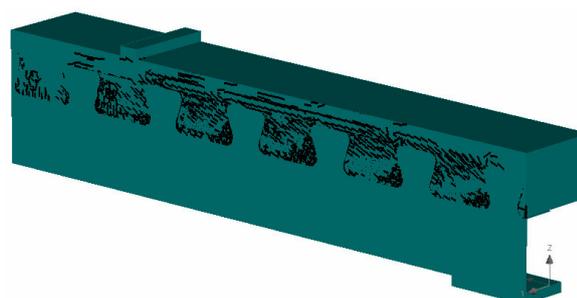


Modelo de laje maciça ($P = 147,04 \text{ kN}$)

d) Carga máxima - lado exterior.



Modelo de laje nervurada ($P=117,64 \text{ kN}$)



Modelo de laje maciça ($P=147,04 \text{ kN}$)

e) Carga máxima - lado interior.

Figura 4.50 – Processos de fendilhação ocorridos no Modelo 3 com conector do tipo Indentado.

Tensões

Na Figura 4.51 e na Figura 4.52 é possível visualizar o diagrama de tensões principais para o patamar de carga máxima atingida nos modelos das vigas mistas com conector do tipo Indentado. Na Figura 4.53 é possível observar esse mesmo diagrama, mas apenas para o conector Indentado.

As tensões principais máximas de compressão na laje de betão nervurada possuem valores na gama de 6,4 MPa a 8 MPa e no conector Indentado de 450 MPa a 521,8 MPa (ver Figura 4.51 (a)). Na viga metálica, do modelo de laje nervurada, as tensões principais máximas de tração situam-se entre 240 MPa e 300 MPa (ver Figura 4.51 (b)). No conector Indentado, do modelo

de laje nervurada, as tensões principais máximas de compressão situam-se entre 450 MPa a 521,8 MPa e as tensões principais máximas de tração situam-se entre 450 MPa e 460 MPa (ver Figura 4.53(a)).

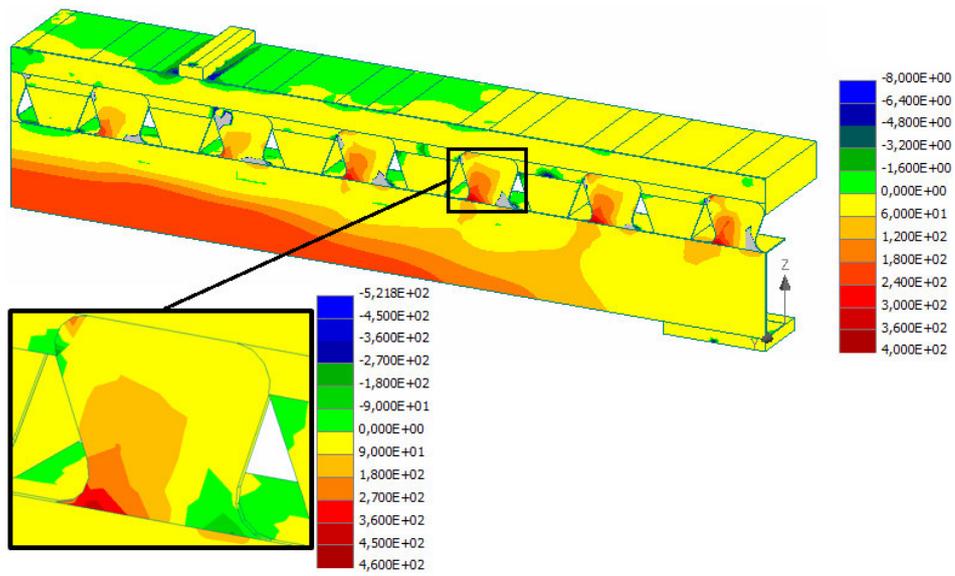
O modelo de laje maciça apresenta como tensões principais máximas de compressão, na laje de betão valores no intervalo de 4,5 MPa a 6 MPa e no conector Indentado valores no intervalo de 150 MPa e 188,7 MPa (ver Figura 4.52(a) e ver Figura 4.53(b)). Na viga metálica, as tensões principais máximas de tração possuem valores entre 250 MPa e 300 MPa e no conector Indentado valores entre 350 MPa e 389 MPa (ver Figura 4.52(b) e ver Figura 4.53(b)).

Conclui-se que os modelos de laje nervurada apresentam tensões máximas superiores às que ocorrem nos modelos de laje maciça, nomeadamente ao nível das tensões de compressão do conector.

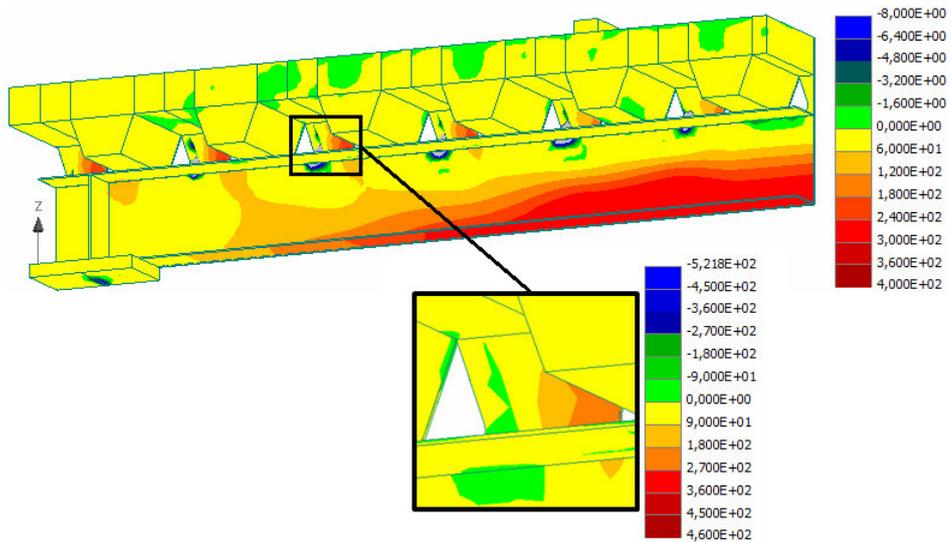
Verifica-se ainda, como se previu nos cálculos efetuados com a Ferramenta de Cálculo, que o modelo de laje nervurada possui um e.n. plástico no banzo superior do perfil e que no modelo de laje maciça o e.n. plástico se situa na laje de betão, tal como acontecia no Modelo 2.

Conclui-se que os modos de rotura associados ao Modelo 3 são similares aos do Modelo 2, para ambos os modelos de laje maciça e nervurada. Com a aplicação do carregamento, a viga mista vai fletindo, provocando na laje de betão uma tendência para se deslocar sobre a chapa perfilada. Logo, à medida que o carregamento aumenta, a laje de betão vai-se deslocando e deformando, forçando os dentes do conector Indentado a fletir na direção do apoio. Assim, irão surgir no conector, zonas de tração de um lado e do outro zonas de compressão, e ocorrerá plastificação dos dentes do conector, conduzindo à máxima capacidade de carga do sistema. No entanto, como já foi referido no Modelo 2, só com a realização de um ensaio é que se poderá comprovar a ocorrência deste comportamento.

A resistência ao corte do conector Indentado, obtida através da Ferramenta de Cálculo, tal como nos modelos anterior (Modelo 2), não se apresenta em concordância com os resultados dos modelos (Modelo 3), pelas razões já especificadas anteriormente.

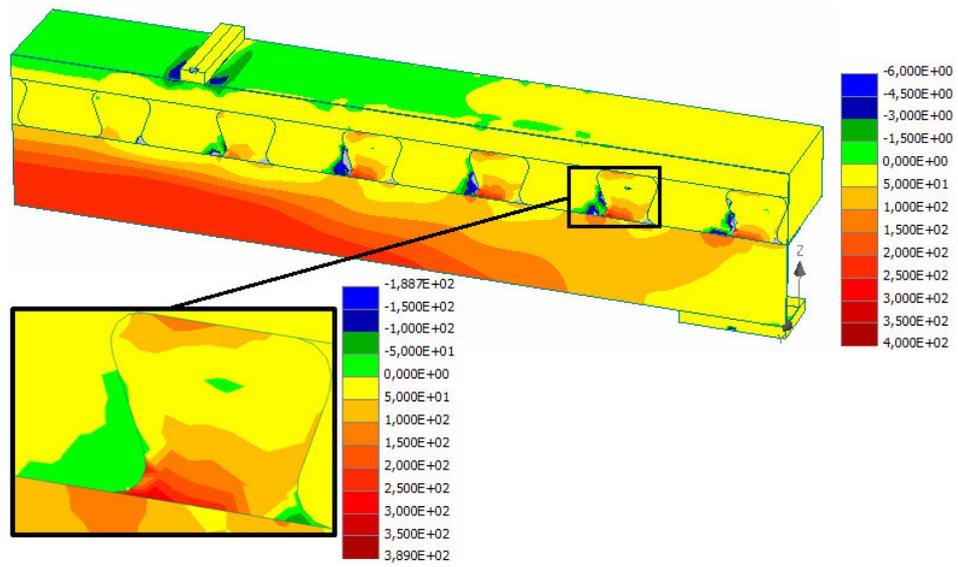


(a) Lado interior

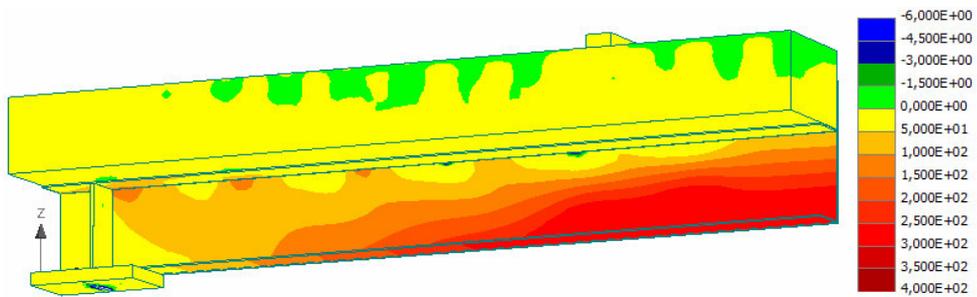


(b) Lado exterior

Figura 4.51 - Tensões Principais no Modelo 3 com laje nervurada e conector Indentado (em MPa).

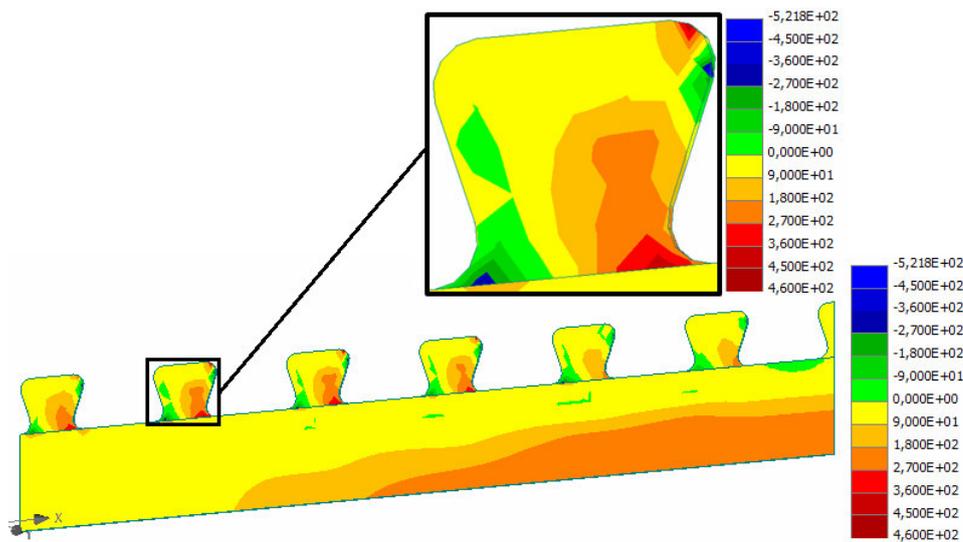


(a) Lado interior

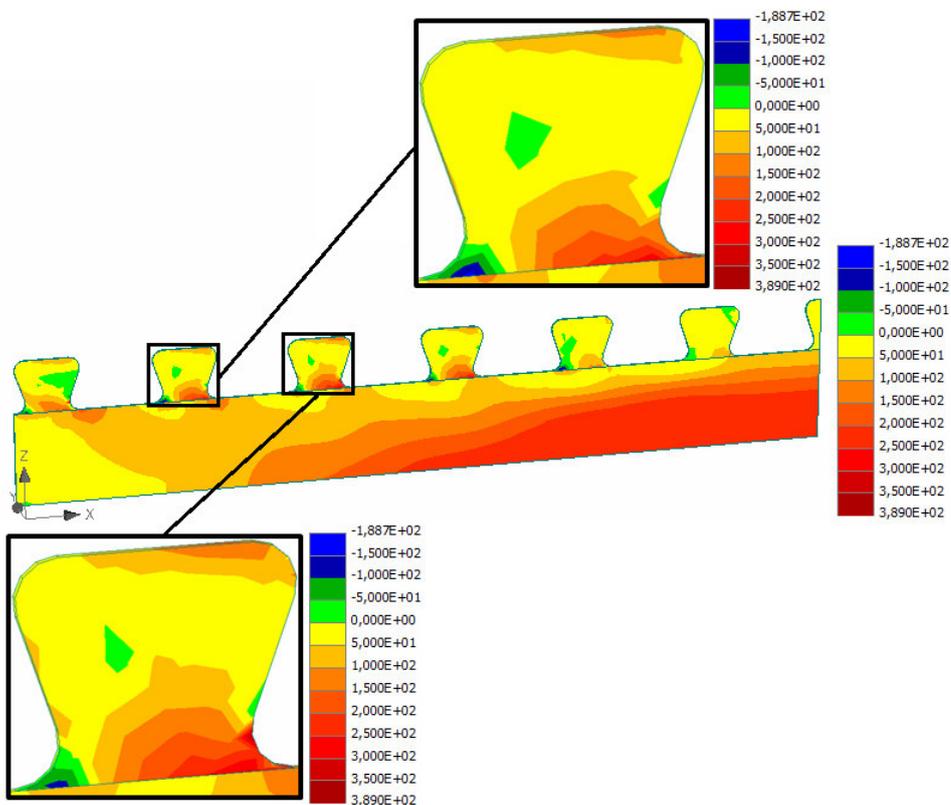


(b) Lado exterior

Figura 4.52 – Tensões Principais no Modelo 3 com laje maciça e conector Indentado (em MPa).



(a) Conector do modelo de laje nervurada.



(b) Conector do modelo de laje maciça.

Figura 4.53 - Tensões Principais no conector Indentado do Modelo 3 (em MPa).

4.2.9.3 Análise comparativa dos Modelos 1B, 2 e 3 da viga mista com conector Indentado

Na Figura 4.54 encontram-se as curvas que relacionam força e deformação a meio vão nos modelos numéricos 1, 2 e 3, com o objetivo de comparar os seus comportamentos à flexão e prever qual o modelo que mais se aproxima do comportamento observado num ensaio à flexão.

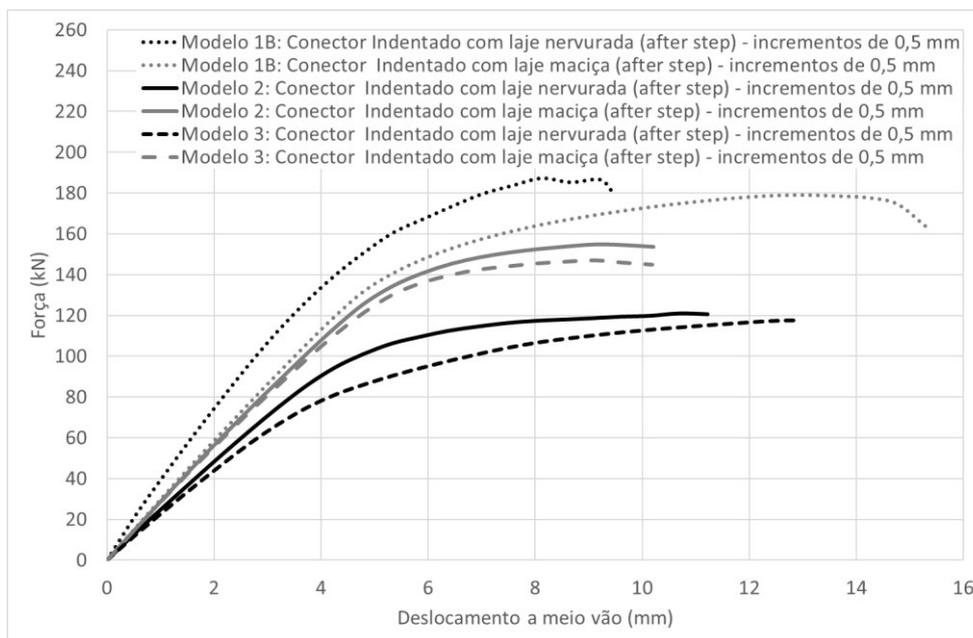


Figura 4.54 - Resultados dos Modelos 1B, 2 e 3 da viga mista com conector do tipo Indentedo.

Com este gráfico é possível verificar claramente que o comportamento do Modelo 1 de laje nervurada se afasta do comportamento dos restantes modelos com laje nervurada e portanto não poderá ser representativo do comportamento real num ensaio à flexão. Contudo, verifica-se que o Modelo 1B de laje maciça possui um comportamento mais coerente, já que os resultados obtidos nos 3 modelos com laje maciça são próximos entre si.

Observa-se também que o Modelo 1B apresenta sempre um comportamento mais rígido do que os modelos 2 e 3 e também maior capacidade de carga.

Todos os modelos testados apresentam um comportamento dúctil, já que próximo da carga máxima desenvolvem deformação vertical significativa.

Para este tipo de conector, verifica-se que a diferença de capacidade de carga máxima entre os modelos com laje maciça e os modelos com laje nervurada não é muito elevada.

4.2.10 Modelo 4 até Modelo 15: modelo base com conector Xadrez + criação de um novo material para a interface conector – laje de betão

Com este modelo pretende-se realizar uma análise mais detalhada a partir do modelo base referente à viga mista com conector Xadrez. Com o intuito de reproduzir o comportamento das nervuras da chapa deste conector, decidiu-se não alterar a sua geometria, o que tornaria o modelo muito complexo e pesado, mas sim introduzir uma superfície de contacto/interface entre o conector e a laje de betão, associando-lhe um material com comportamento específico.

Este material é definido através das seguintes variáveis: rigidez normal (K_{nn}), rigidez tangencial (K_{tt}), resistência à tração (f_t), coesão (C) e coeficiente de fricção. Considera-se ainda que esta interface tem capacidade de redistribuição de esforços, ou seja, quando a tensão de corte

máxima é atingida (C) numa zona, os acréscimos de esforço de corte são suportados pelas zonas que estão próximas e onde a tensão de corte máxima ainda não foi atingida (ver Figura 4.58). Se não existisse esta capacidade de redistribuição, quando se atingisse o valor da coesão num determinado ponto, a correspondente capacidade resistente cairia para um valor nulo, o que não é representativo do comportamento real.

A definição da curva representada na Figura 4.58 é baseada no trabalho desenvolvido por Thomann & Lebet, (2007), onde o deslocamento máximo apresenta um valor de aproximadamente 10 mm.

Para escolher os valores das variáveis C e K_t recorreu-se a bibliografia, de modo a que os valores selecionados retratassem um comportamento o mais próximo possível de um ensaio real. Posto isto, recorreu-se aos trabalhos desenvolvidos por Diógenes et al. (2015) e Thomann & Lebet (2007), para selecionar valores adequados para a rigidez tangencial e para a coesão.

O estudo efetuado por Diógenes et al. (2015) baseia-se num conjunto de ensaios de tipo *push-out*, onde se testa uma chapa (conector) do tipo Xadrez. O trabalho referido estudou soluções semelhantes à que é considerada no caso presente, apesar de algumas propriedades como o tipo de betão ou tipo de aço por exemplo não serem exatamente iguais.

O estudo levado a cabo por Thomann & Lebet (2007), tem em conta a realização de ensaios *push-out* com aplicação adicional de uma tensão de compressão (na direção perpendicular à direção de aplicação dos esforços de corte), ou seja, para além do carregamento vertical comum nos ensaios *push-out*, é ainda aplicada uma carga lateral que comprime o provete (ver Figura 3.45). Este estudo pode ser utilizado como referência para o presente trabalho, pois o tipo de chapa ensaiada é uma chapa nervurada do tipo Xadrez e a tensão de compressão aplicada pode ser vista como uma maneira de simular o confinamento, que neste estudo é assegurado pela armadura inserida na laje de betão.

Para o cálculo da coesão consideraram-se as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios referidos e selecionou-se a curva com a capacidade de carga mais baixa, por ser mais conservativa e por não haver certezas quanto ao nível de confinamento proporcionado pelas armaduras e pela chapa nervurada da laje mista. Dividiu-se a carga máxima dessa curva pela área de contacto entre o conector e a laje de betão.

O valor da rigidez tangencial foi também obtido a partir da curva força-deslocamento com capacidade de carga máxima mais baixa, sendo o K_t definido como o coeficiente angular da reta que passa entre a origem da referida curva e o seu ponto de máxima força.

A Equação (4.8) demonstra o cálculo efetuado para determinar o valor da coesão, tendo em conta o estudo realizado por Diógenes et al. (2015).

Na Figura 4.55 encontram-se representadas as medidas utilizadas na determinação da área de contacto, para se proceder ao cálculo da coesão.

O valor da rigidez tangencial determinado com base nesse estudo possui um valor de aproximadamente 8 MN/m^3 (Diógenes, H. J. F., 2013).

$$C = \frac{\frac{F_{\text{máx}}}{2}}{2 \times A_{\text{contacto}}} = \frac{\frac{620}{2}}{2 \times 0,065 \times 0,57} = 4183,54 \text{ kN/m}^2 = 4,2 \text{ MN/m}^2 \cong 4 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

em que:

A_{contacto} área de contacto com a superfície de betão;

$F_{\text{máx}}$ capacidade de carga máxima.

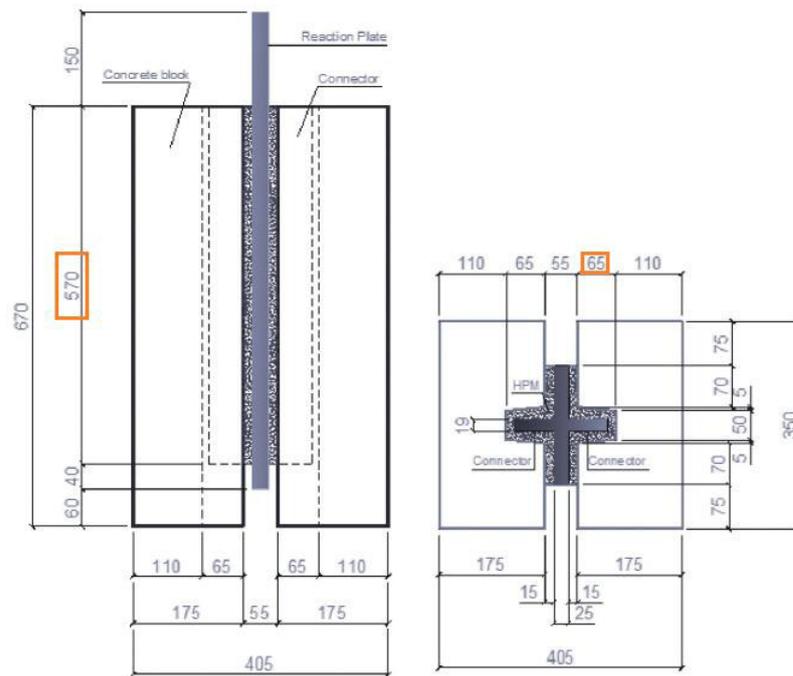


Figura 4.55 – Área de contacto do conector em mm. (adaptado de Diógenes et al., 2015)

As Equações (4.9), (4.10), (4.11) e (4.12), apresentam os cálculos realizados para a determinação do valor da coesão, tendo por base o estudo realizado por Thomann & Lebet, (2007). Como se pode visualizar na Figura 4.56, existem 4 curvas diferentes, pois nesse estudo, foram ensaiados provetes com diferentes valores de tensão de compressão (0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa, 2,5 MPa). Logo, serão calculados 4 valores de coesão, um para cada uma das curvas.

Na Figura 4.57 é possível verificar as medidas para o cálculo da área de contacto, bem como o esquema do ensaio que foi realizado.

O valor da rigidez tangencial calculado com base nesse estudo é de $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

$$C = \frac{\frac{F_{m\acute{a}x}}{2}}{2 \times A_{contacto}} = \frac{\frac{470}{2}}{2 \times 0,3 \times 0,2} = 1958,33 \text{ kN/m}^2 = 1,96 \text{ MN/m}^2 \cong 2 \text{ MPa} \quad (4.9)$$

$$C = \frac{\frac{F_{m\acute{a}x}}{2}}{2 \times A_{contacto}} = \frac{\frac{370}{2}}{2 \times 0,3 \times 0,2} = 1541,67 \text{ kN/m}^2 = 1,54 \text{ MN/m}^2 \cong 1,5 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

$$C = \frac{\frac{F_{m\acute{a}x}}{2}}{2 \times A_{contacto}} = \frac{\frac{250}{2}}{2 \times 0,3 \times 0,2} = 1041,67 \text{ kN/m}^2 = 1,04 \text{ MN/m}^2 \cong 1 \text{ MPa} \quad (4.11)$$

$$C = \frac{\frac{F_{m\acute{a}x}}{2}}{2 \times A_{contacto}} = \frac{\frac{150}{2}}{2 \times 0,3 \times 0,2} = 625 \text{ kN/m}^2 = 0,63 \text{ MN/m}^2 \cong 0,6 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

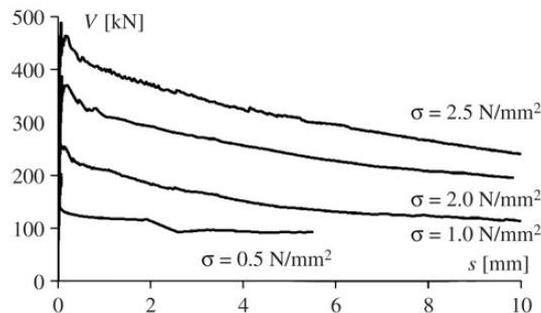


Figura 4.56 – Curva força-deslocamento para cada nível de tensão de compressão considerado e para os provetes com chapa do tipo R1. (Thomann & Lebet, 2007)

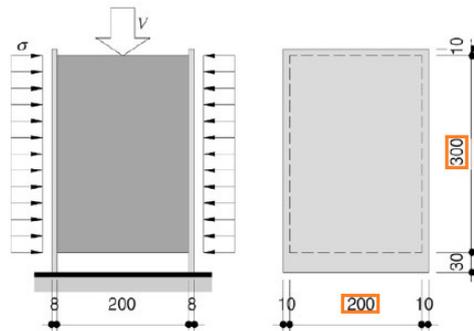


Figura 4.57 – Esquema de ensaio e geometria dos provetes. (adaptado de Thomann & Lebet, 2007)

O valor da rigidez normal é um valor alto, de modo a que não ocorra separação vertical entre a laje e os perfis metálicos. O coeficiente de fricção é igual a zero, assumindo-se que não se geram forças de atrito na interface dos dois materiais. O valor da resistência à tração foi arbitrado de 100 MPa. Escolheu-se um valor alto, de forma a que este parâmetro não seja condicionante no comportamento dos modelos.

Posto isto, os parâmetros que se irão variar são a rigidez tangencial (K_t) e a coesão (C).

Através dos estudos desenvolvidos por Diógenes et al. (2015) e Thomann & Lebet (2007), optou-se por utilizar na interface entre o conector Xadrez e a laje de betão um valor de K_t igual a $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ e a $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$, respetivamente. Também com base nesses autores foi possível a determinação do valor da coesão (cálculos realizados anteriormente), optando-se deste modo por fazer variar C entre os valores de 4 MPa, 2 MPa, 1,5 MPa, 1 MPa e 0,6 MPa. Assim, para K_t igual a $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ teremos coesões com os valores de 4 MPa, 2 MPa, 1,5 MPa, 1 MPa e 0,6 MPa, perfazendo um total de 10 modelos, 5 para a viga mista de laje nervurada e outros 5 para a viga mista de laje maciça. Também para um K_t de $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ teremos variações de coesão de 4 MPa, 2 MPa, 1,5 MPa, 1 MPa e 0,6 MPa, obtendo-se mais 10 modelos.

Na Figura 4.58 é possível visualizar um exemplo do material criado para uma coesão de 4 MPa e para uma rigidez tangencial de $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

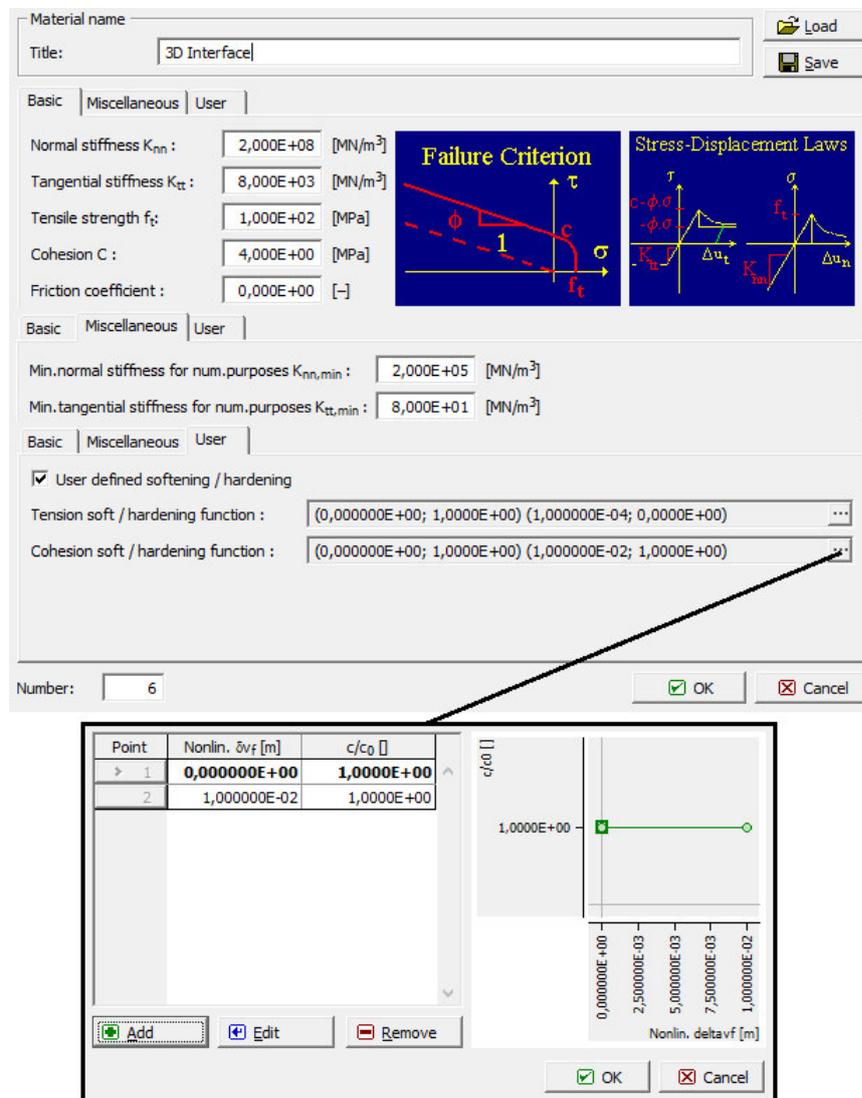


Figura 4.58 – Material de interface laje-conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, definido no Software ATENA 3D.

Depois de criado o material de interface é necessário aplicá-lo no contacto pretendido, para tal recorre-se ao menu para a definição das superfícies de contacto (através do *contact element - GAP*).

O Anexo IV apresenta uma síntese destes modelos, com o objetivo de facilitar a leitura das variações dos parâmetros K_t e C .

4.2.10.1 Modelo 4 até Modelo 8, com rigidez tangencial igual a $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$

Estes modelos possuem um valor constante de rigidez tangencial de $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$, sendo a única variável o valor da coesão:

- Modelo 4 - $C = 4 \text{ MPa}$;
- Modelo 5 - $C = 2 \text{ MPa}$;
- Modelo 6 - $C = 1,5 \text{ MPa}$;
- Modelo 7 - $C = 1 \text{ MPa}$;
- Modelo 8 - $C = 0,6 \text{ MPa}$.

Viga mista com laje nervurada

Na Figura 4.59 está representado o gráfico com as curvas força-deslocamento para os modelos com conector Xadrez de laje nervurada, onde o material de interface possui um valor de K_t de $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

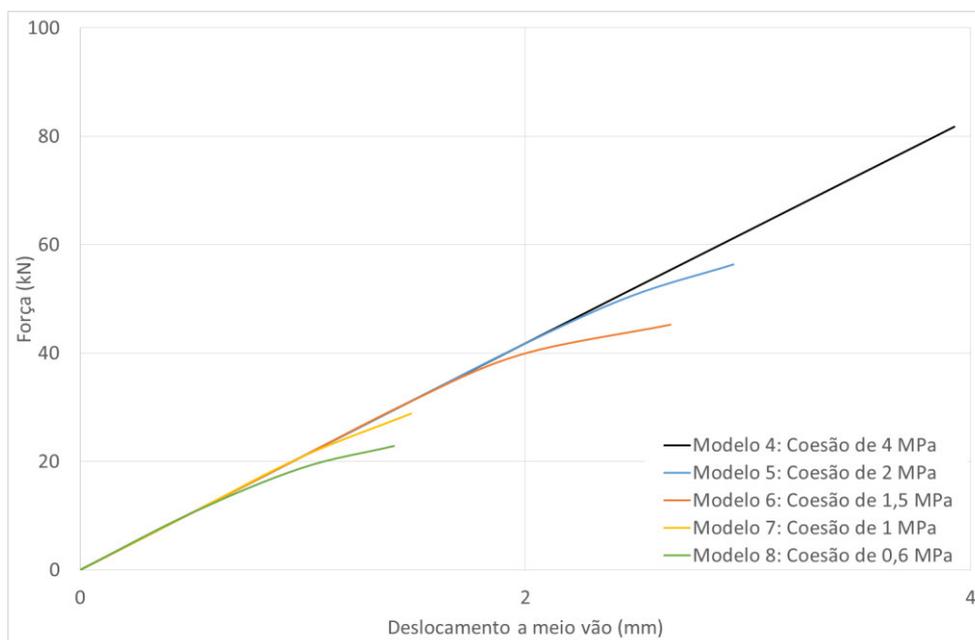


Figura 4.59 - Resultados dos Modelos 4 até 8, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.

Como se pode verificar a partir do gráfico da Figura 4.59, o comportamento inicial dos cinco modelos é coincidente, ou seja a rigidez inicial é a mesma. No entanto, percebe-se que a coesão condiciona bastante o comportamento da viga mista, pois quanto maior é a coesão, maior é a capacidade de carga da viga mista.

Conclui-se que a resistência à flexão da viga mista é condicionada pela resistência da conexão, pois variando o valor da coesão, varia-se também a capacidade de carga da viga mista. Verifica-se também, que para os valores de coesão considerados, o comportamento da viga mista se encontra ainda numa fase elástica ou quase elástica, já que se observa uma relação direta entre a força aplicada e o correspondente valor de deformação vertical.

As curvas representadas na Figura 4.59, mostram que a viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez apresenta uma ductilidade mais baixa do que a viga mista com laje nervurada e conector do tipo Indentado.

Viga mista com laje maciça

Na Figura 4.60 está representado o gráfico com as curvas força-deslocamento para os modelos de viga mista com conector Xadrez e laje maciça, onde o material de interface possui um valor de K_i de $8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$. Neste caso, fez-se variar o valor da coesão, em intervalos iguais aos que foram considerados para a laje nervurada.

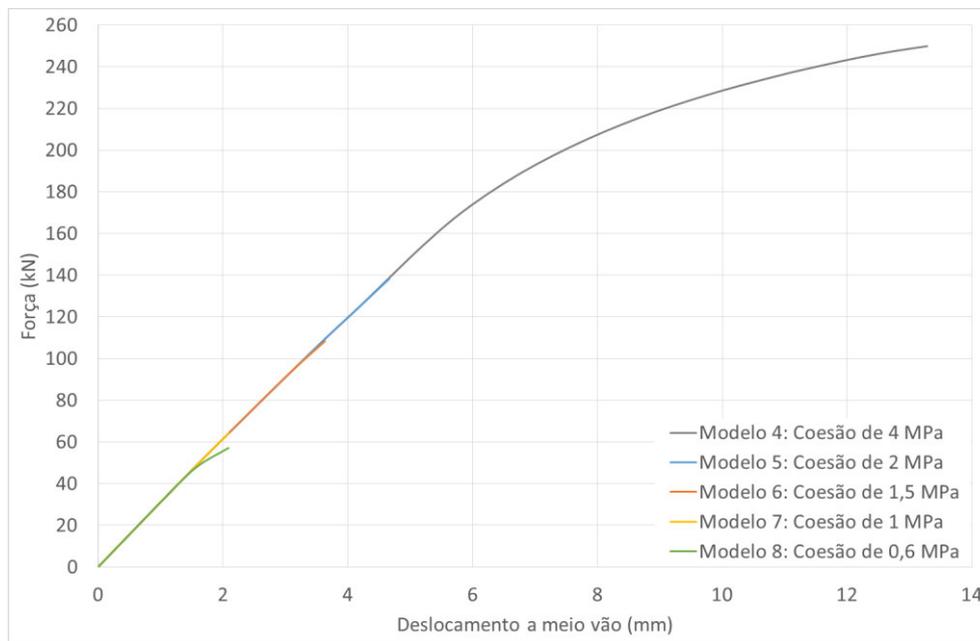


Figura 4.60 - Resultados dos Modelos 4 até 8, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje maciça.

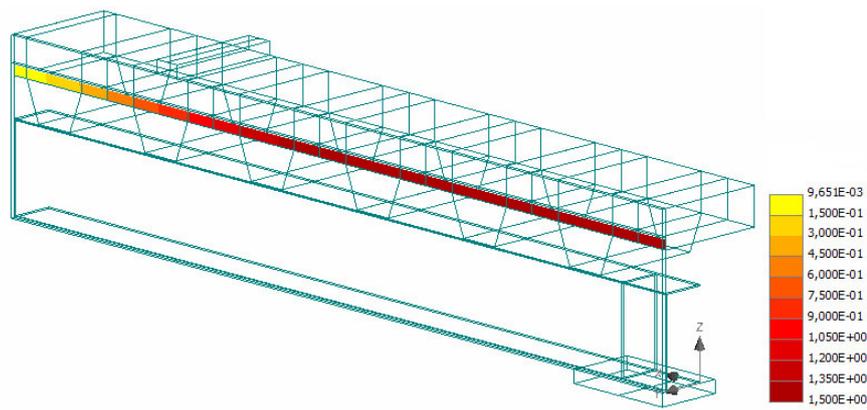
O comportamento da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez, é semelhante ao comportamento observado na viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez. No entanto, a viga com laje maciça consegue atingir maiores cargas e maiores deslocamentos do

que a viga mista com laje nervurada, para todos os níveis de coesão considerados. No modelo com laje maciça e coesão igual a 4 MPa, verifica-se que a viga mista é capaz de desenvolver alguma plastificação, o que não acontece em nenhum dos outros modelos. Conclui-se que nos modelos com valor de coesão mais baixo, a capacidade resistente é muito condicionada pela resistência da própria conexão. Nestes casos, o comportamento da viga mista é aproximadamente linear elástico até atingir o valor de carga máximo.

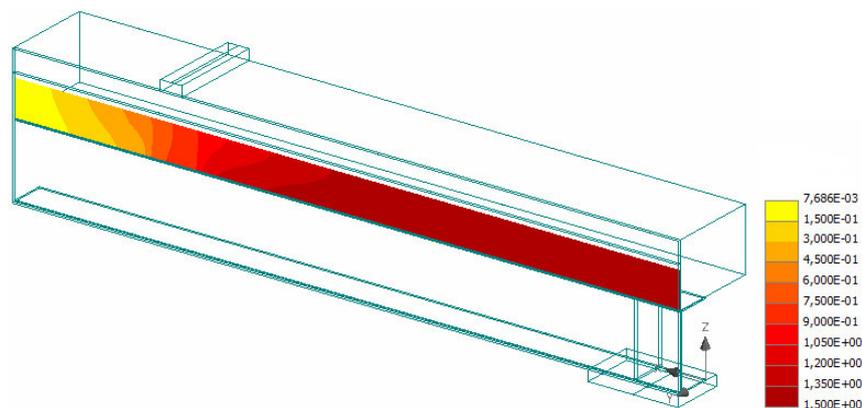
Tensões na Interface

Na Figura 4.61 observa-se um exemplo dos diagramas de tensões registadas para uma coesão de 1,5 MPa e um K_t constante de $8,0 \times 10^3$ MN/m³. A tensão máxima é atingida nos apoios e há redistribuição entre o ponto de carregamento e o apoio, até ao ponto em que se esgota a capacidade de carga da viga mista para o valor de coesão em questão.

Independentemente do valor da coesão e do valor da rigidez tangencial considerados, o comportamento exibido na Figura 4.61 é o mesmo nos vários modelos testados.



(a) Modelo da viga mista de laje nervurada.



(b) Modelo da viga mista de laje maciça.

Figura 4.61 – Tensões na Interface dos modelos numéricos com conector Xadrez, de rigidez tangencial constante igual a $8,0 \times 10^3$ MN/m³ e coesão igual a 1,5 MPa.

4.2.10.2 Modelo 9 até Modelo 13, com rigidez tangencial igual a $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$

Estes modelos possuem um valor constante de rigidez tangencial de $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$, sendo a única variável o valor da coesão:

- Modelo 9 - $C = 4 \text{ MPa}$;
- Modelo 10 - $C = 2 \text{ MPa}$;
- Modelo 11 - $C = 1,5 \text{ MPa}$;
- Modelo 12 - $C = 1 \text{ MPa}$;
- Modelo 13 - $C = 0,6 \text{ MPa}$.

Viga mista com laje nervurada

Na Figura 4.62 está representado o gráfico com as curvas força-deslocamento para os modelos com conector Xadrez de laje nervurada, onde o material de interface possui um valor de K_t de $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

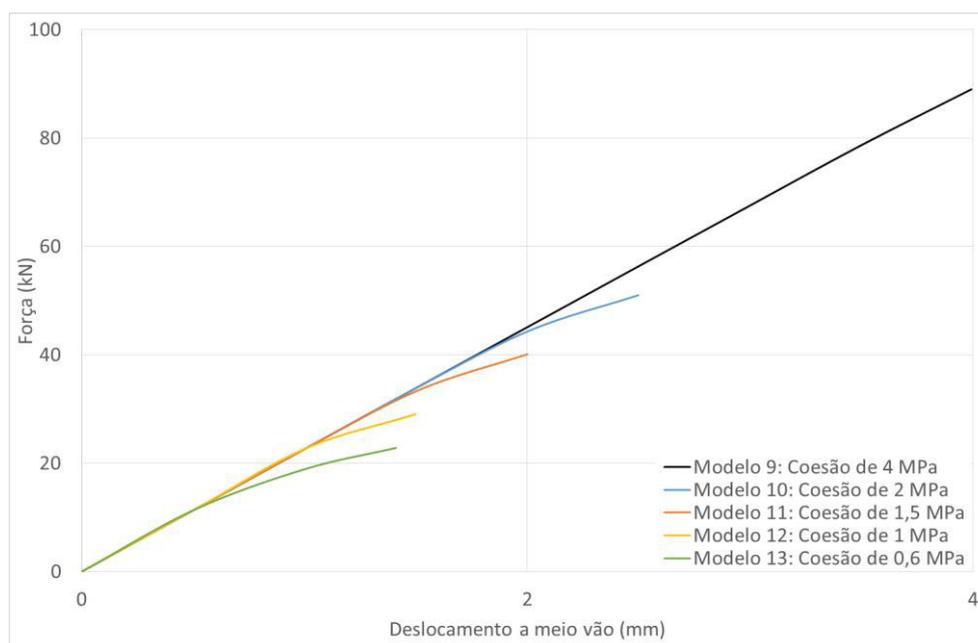


Figura 4.62 - Resultados dos Modelos 9 até 13, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.

Como se pode verificar, também neste caso a coesão condiciona o comportamento da viga mista, pois à medida que a coesão diminui, a capacidade de carga da viga decresce. Assim, independentemente da rigidez tangencial que a viga mista possa ter, o valor de coesão considerado vai sempre limitar a resistência máxima da viga.

No entanto, nota-se um ligeiro aumento da rigidez comparativamente com os modelos apresentados na Figura 4.59, já que a rigidez tangencial aumentou neste caso.

Viga mista com laje maciça

Na Figura 4.63 está representado o gráfico com as curvas força-deslocamento para os modelos com conector Xadrez e laje maciça, onde o material de interface possui um valor de K_t de $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

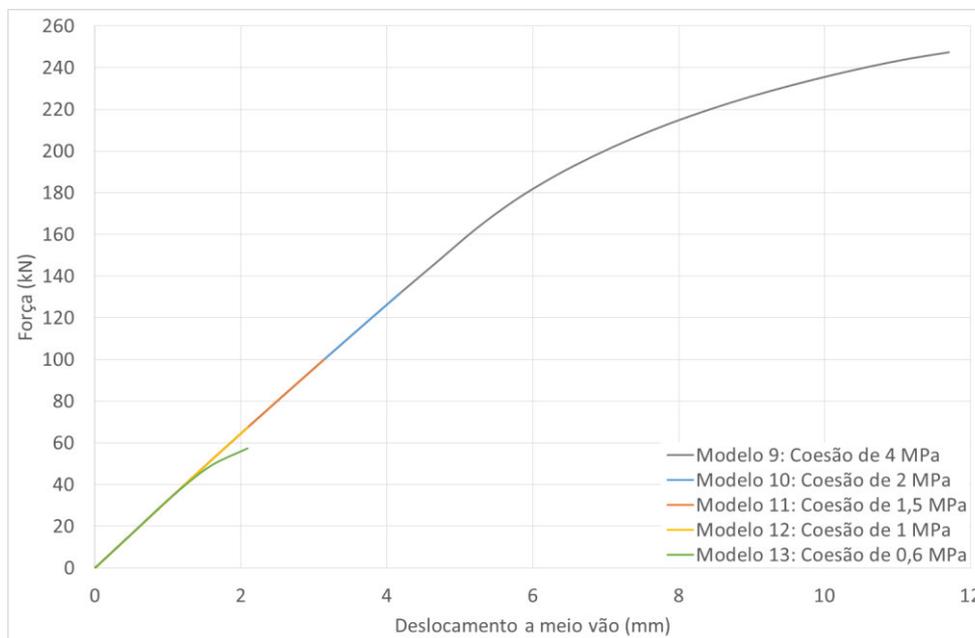


Figura 4.63 - Resultados dos Modelos 9 até 13, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje maciça.

Neste caso, também a coesão é responsável pela carga máxima que a viga consegue atingir e também se verifica um ligeiro aumento da rigidez, quando comparado com os modelos da Figura 4.60.

O comportamento da viga mista de laje maciça com conector Xadrez é idêntico ao comportamento da viga mista de laje nervurada com conector Xadrez, no entanto, os modelos com laje maciça apresentam capacidade de carga superior, tal como acontecia nos modelos referidos anteriormente (Modelos de 4 até 8). Isto deve-se à maior área de contacto entre o conector Xadrez e a laje de betão no caso da laje maciça, ou seja, o modelo de laje maciça não apresenta a redução de secção correspondente às nervuras.

4.2.10.3 Comparação entre o Modelo 4, o Modelo 9, o Modelo 14 e o Modelo 15

Os modelos 4, 9, 14 e 15 possuem um valor constante de coesão, igual a 4 MPa, sendo a única variável o valor da rigidez tangencial:

- Modelo 4 - $K_t = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$;
- Modelo 9 - $K_t = 11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$;
- Modelo 14 - $K_t = 2000,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$;
- Modelo 15 - $K_t = 70,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$.

O Modelo 14 tem como finalidade representar o Modelo 1 da viga mista com conector Xadrez de laje nervurada, ou seja, com a mesma rigidez (ou valor muito elevado) mas limitado pelo valor da coesão, para uma melhor comparação com os restantes modelos. Portanto, o valor da rigidez tangencial tem de ser de tal modo elevado, que o comportamento inicial seja igual ao do Modelo 1.

Como se pode verificar através da Figura 4.64, a compatibilidade entre a rigidez do Modelo 1 e do Modelo 14 foi conseguida, pois o comportamento inicial de ambos os modelos é igual. Na curva do Modelo 14 observa-se que, apesar do comportamento ser limitado pela coesão máxima, ou seja, o modelo não consegue atingir um patamar de carga tão elevado como no Modelo 1, para a mesma carga consegue atingir maiores deslocamentos garantindo uma elevada ductilidade, que no Modelo 1 não se verificou.

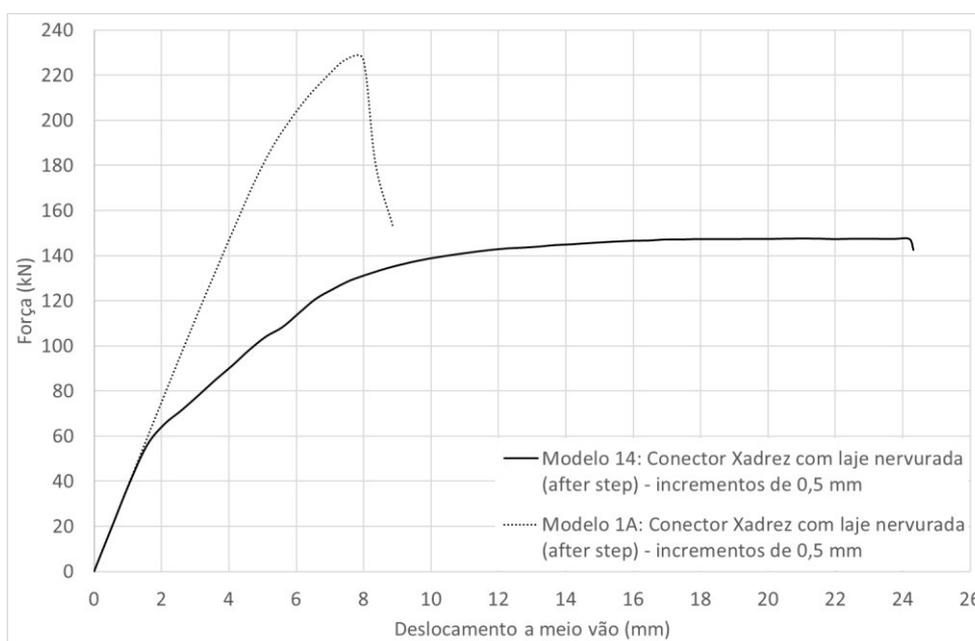


Figura 4.64 - Modelos 1 e 14: viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada. (preto contínuo – $K_i=2000,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$, preto descontínuo – sem material de interface)

O Modelo 15 possui uma rigidez tangencial calculada com base nos resultados experimentais realizados por Thomann & Lebet (2007), a qual foi obtida, não a partir da força máxima mas sim considerando um carregamento igual a 2/3 da força máxima e a correspondente deformação.

Na Figura 4.65 encontram-se os modelos 4, 9, 14 e 15 da viga mista com conector Xadrez e laje nervurada.

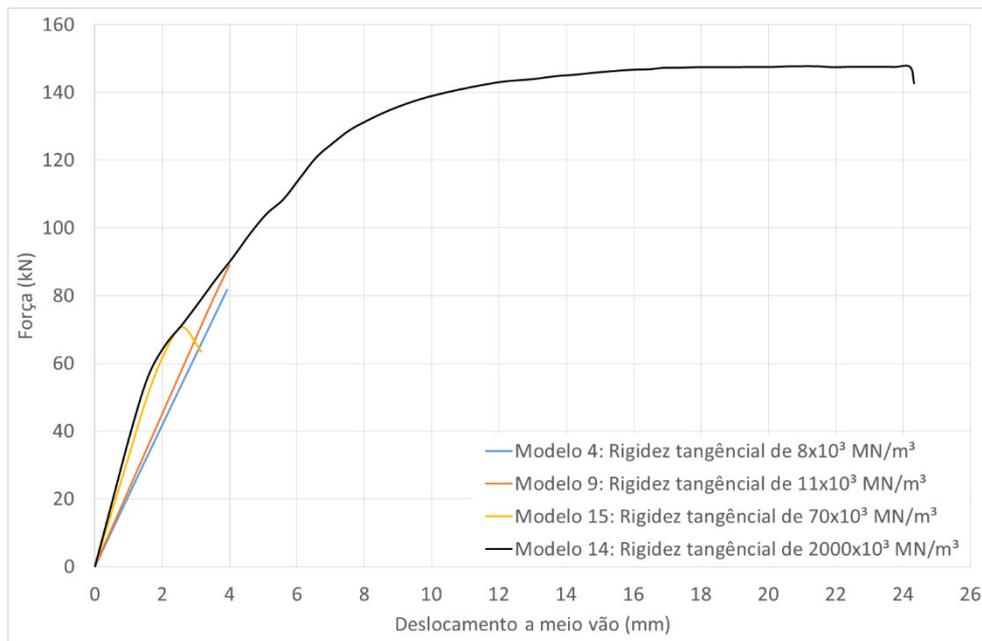


Figura 4.65 - Modelos 4, 9, 14 e 15, da viga mista com conector do tipo Xadrez de laje nervurada.

Como é possível verificar, com a alteração da rigidez tangencial, as curvas força-deslocamento apresentam comportamentos iniciais diferentes. As curvas que mais se aproximam do modelo infinitamente rígido são a curva do Modelo 14 e a curva correspondente ao Modelo 15.

4.2.10.4 Análise comparativa dos Modelos 1A e dos Modelos do 4 até ao 14, da viga mista com conector Xadrez

Na Figura 4.66 e na Figura 4.67 estão representadas as curvas força-deslocamentos dos modelos com conector Xadrez de laje nervurada.

Na Figura 4.68 e na Figura 4.69 estão representadas as curvas força-deslocamentos dos modelos com conector Xadrez de laje maciça.

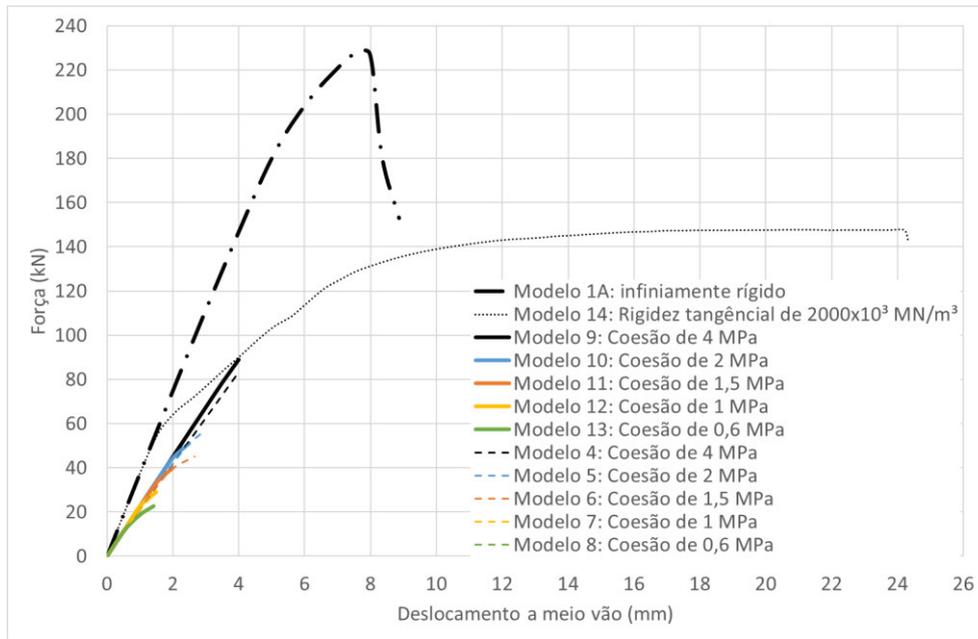


Figura 4.66 – Modelos da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelo 14: $C = 4 \text{ MPa}$).

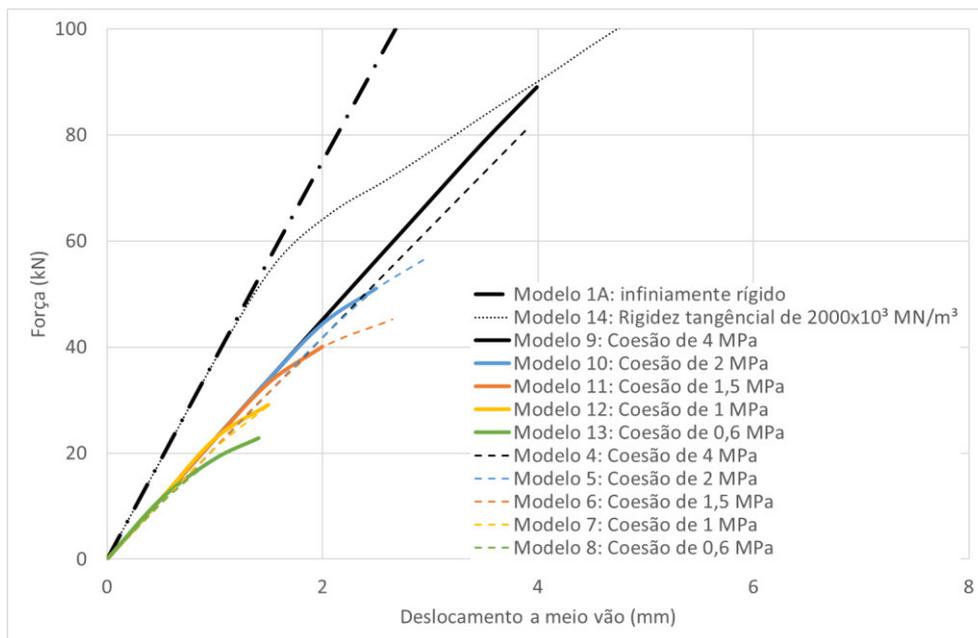


Figura 4.67 – Fase inicial das curvas força-deslocamento dos Modelos da viga mista com laje nervurada e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$; Modelo 14: $C = 4 \text{ MPa}$).

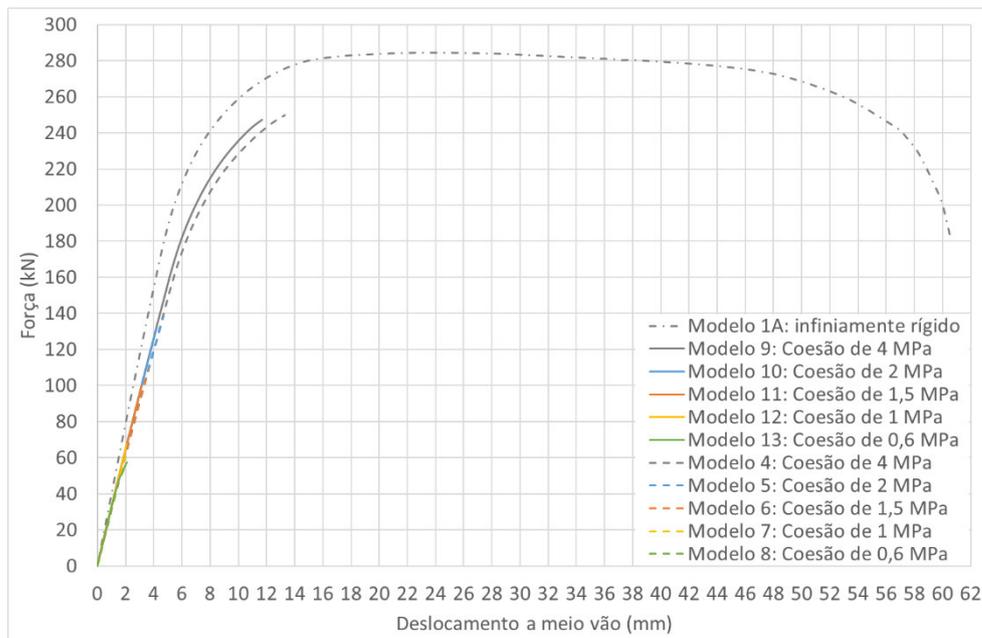


Figura 4.68 - Modelos da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0\times 10^3\text{MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0\times 10^3\text{MN/m}^3$).

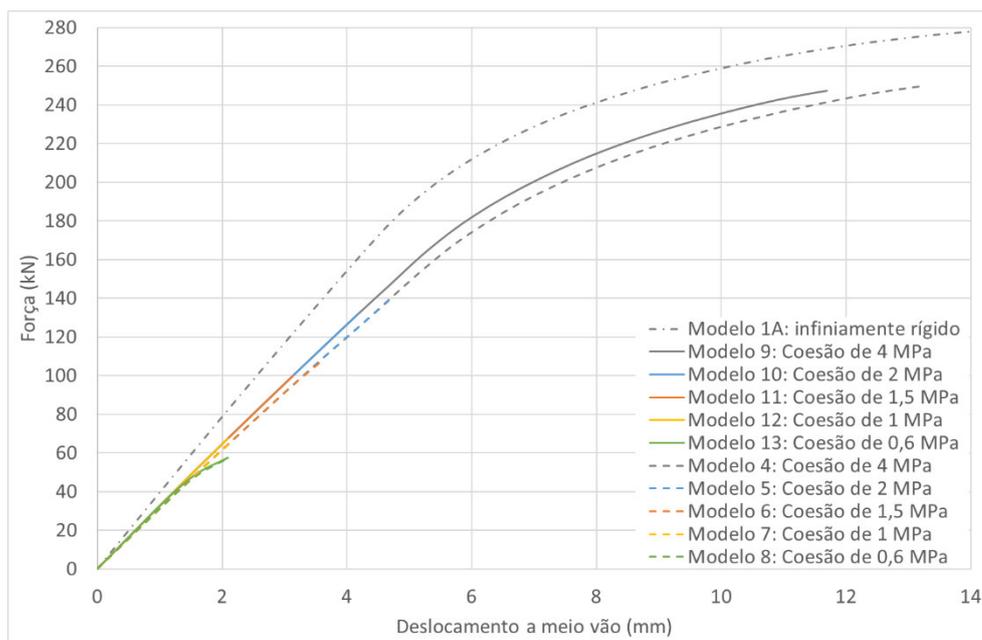


Figura 4.69 – Fase inicial das curvas força-deslocamento dos Modelos da viga mista com laje maciça e conector do tipo Xadrez. (Modelos do 9 ao 13: $K_t=11,0\times 10^3\text{MN/m}^3$; Modelos do 4 até ao 8: $K_t=8,0\times 10^3\text{MN/m}^3$).

Nos modelos de laje nervurada, observa-se que com a limitação da coesão existe um elevado decréscimo da capacidade de carga, relativamente ao modelo infinitamente rígido e coesão ilimitada. Nos modelos de laje maciça, a limitação da coesão, tem menos impacto sobre a capacidade de carga do que nos modelos de laje nervurada, porque a área de contacto entre o conector e a laje de betão é maior, permitindo mobilizar tensões de corte numa área maior. Quanto menor é o valor da coesão, menor é a capacidade de carga máxima e aí,

independentemente da laje analisada, o valor da coesão terá bastante influência. Assim sendo, era muito importante a calibração destes modelos através de um ensaio à flexão para se conseguir saber com maior precisão qual a coesão que seria de esperar e se com esta, o comportamento se aproxima dos modelos aqui estudados.

É de notar ainda, que com o aumento da rigidez, o comportamento da viga mista se aproxima do comportamento obtido com o modelo infinitamente rígido. Contudo, sabe-se que na realidade o modelo será mais flexível do que o Modelo 1, podendo assim possuir uma rigidez semelhante a um dos modelos estudados.

Se num ensaio à flexão, a coesão se situar entre os valores referidos, o sistema com o conector Xadrez não possuirá uma capacidade de carga muito superior ao do sistema com conector Indentado.

4.2.11 Comparação dos modelos da viga mista com conector Xadrez com os modelos da viga mista com conector Indentado

Na Figura 4.70 e na Figura 4.71 estão representados os gráficos dos modelos 1A, 2, 14 e 9 que nos irão permitir comparar o comportamento à flexão destes sistemas com os dois tipos de conectores diferentes, chapa dupla nervurada do tipo Xadrez e chapa lisa simples do tipo Indentado.

Estes modelos são difíceis de comparar, pois os conectores utilizados são diferentes pela sua espessura e pelo seu material. No caso do conector Xadrez, a sua espessura é de 12 mm e o tipo de aço é um S235, valores superiores ao conector Indentado, que possui uma espessura de 5 mm e um aço S220.

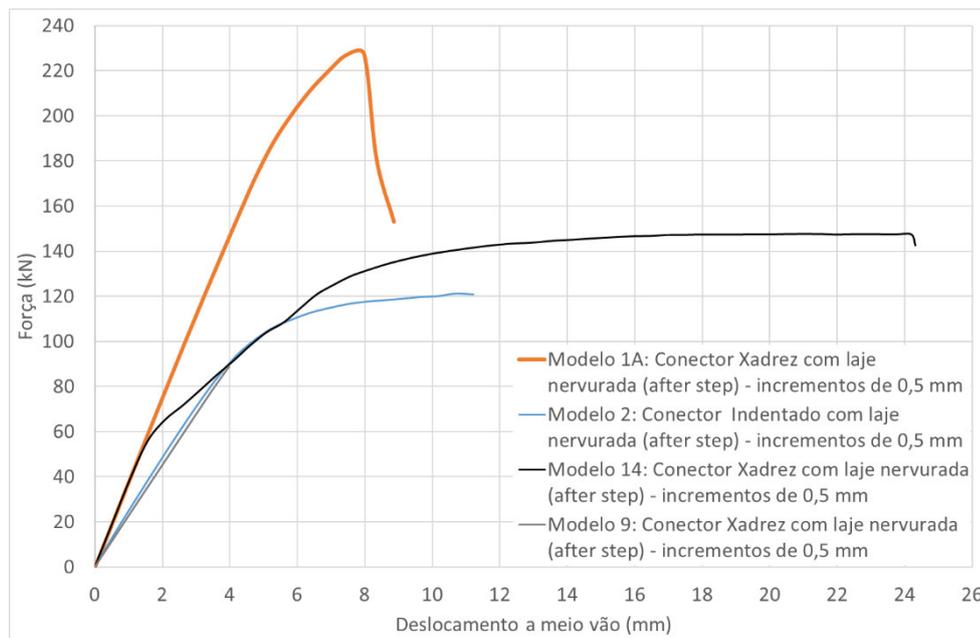


Figura 4.70 - Modelos 1A, 2, 14 e 9 da viga msita com laje nervurada.

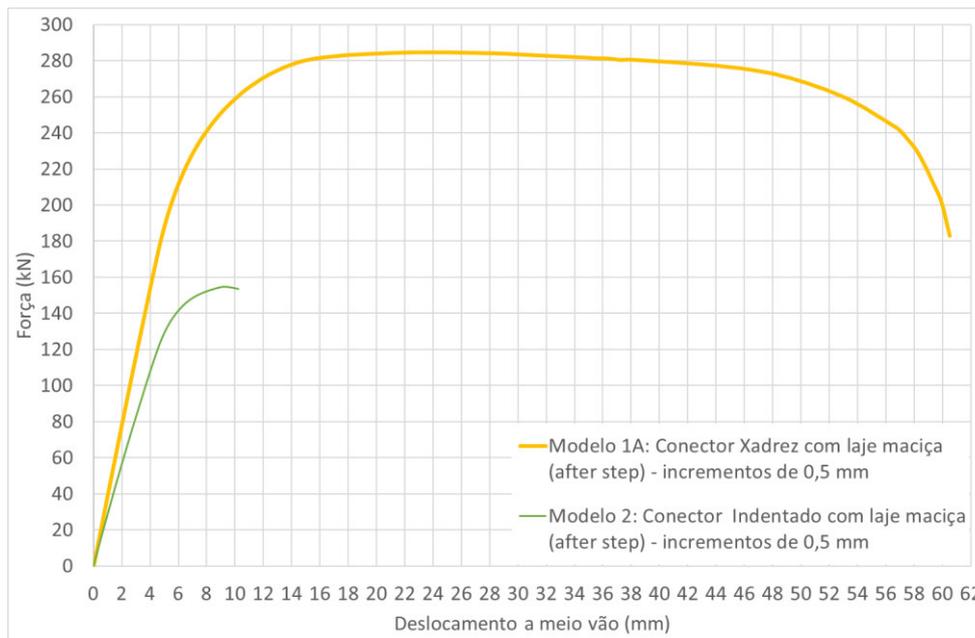


Figura 4.71 - Modelos 1A e 2 da viga mista com laje maciça.

Como se pode verificar, o modelo infinitamente rígido com conector Xadrez (Modelo1A), é o que possui uma maior capacidade de carga. No entanto, se aquando de ensaios se constatar que a capacidade resistente da conexão é um fator condicionante, a sua resistência diminuirá, tal como é previsto com o Modelo 14. Apesar desta possível limitação, verifica-se que capacidade de carga da viga mista com conector Xadrez é superior à capacidade de carga do modelo com conector Indentado (Modelo 2 e laje nervurada).

Contudo, ainda existe a condicionante da rigidez, isto é, vão existir sempre alguns movimentos relativos entre o conector Xadrez e a laje de betão. Assim sendo, prevê-se que a rigidez apresente valores no intervalo dos valores que foram considerados nos modelos aqui estudados. Se a rigidez baixar para valores de por exemplo $11,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$ (Modelo 9), a capacidade de carga e a rigidez do modelo com conector Xadrez serão inferiores às do modelo com conector Indentado, podendo nesse caso ser mais vantajoso utilizar sistemas de laje nervurada com conector Indentado.

Assim pode-se concluir, que a viga mista com conector Xadrez poderá apresentar menor capacidade de carga do que a viga mista com conector Indentado, nos casos em que o comportamento da conexão com conector Xadrez for condicionado pelo valor da coesão e também da rigidez. Nessa situação, a utilização do conector Indentado poderá ser mais vantajosa, tanto pela capacidade resistente demonstrada como pelo menor custo de material que lhe está associado.

No Tabela AV.1 dos Anexo V, encontram-se as cargas máximas obtidas para cada um dos 20 modelos aqui analisados.

Caracterização Geométrica dos Provetes

No presente capítulo são descritos os procedimentos desenvolvidos para a preparação dos provetes a ensaiar. Esta preparação consiste na criação de desenhos dos provetes e das cofragens e na criação de mapas de quantidades.

Para que todos os detalhes estivessem assegurados decidiu-se usufruir das potencialidades associadas ao *Software Tekla Structures Learning*, já que este permite gerar desenhos automáticos de qualquer corte ou alçado pretendido a partir do modelo 3D construído. Neste modelo 3D, cada alteração efetuada será automaticamente corrigida no desenho. A utilização deste *Software* possibilita também um melhor controlo na construção dos provetes, na preparação e estabilização das cofragens e na montagem dos futuros ensaios.

Existem ainda outras vantagens associadas a este *Software*, como é o caso da geração de mapas de quantidades automáticos a partir do modelo 3D, o que se mostra bastante útil para posteriormente se poder enviar informação para a empresa responsável pelo fabrico dos provetes. A empresa responsável por esse fabrico é OFELIZ, que também utiliza o *Software Tekla Structures* na sua atividade produtiva, acompanhando toda a fase de preparação em estaleiro. Deste modo, o modelo criado para as vigas mistas é o mesmo modelo depois utilizado na empresa OFELIZ na respetiva fabricação.

Com o uso do *Software Tekla Structures* podemos ainda tirar partido da visualização do modelo 3D, o que possibilita a deteção de possíveis erros associados ao desenho e um melhor esclarecimento de dúvidas na fabricação e montagem dos provetes. Num modelo 2D essa deteção seria mais difícil.

5.1 Modelo 3D

Procedeu-se à construção do modelo 3D para quatro provetes, em que os dois primeiros provetes são destinados ao ensaio de uma viga mista, associando a viga metálica (C 140 × 60 × 2,0), o conector (220 mm × 2512,1 mm) e a laje mista (60 mm × 350 mm) e os dois últimos provetes são destinados ao ensaio *push-out* para avaliação do comportamento do conector.

Para cada ensaio, construíram-se dois modelos, sendo cada um correspondente a um modelo de conectores diferente. Os provetes 1 e 3 são constituídos por um conector de chapa nervurada de

tipo Xadrez e os provetes 2 e 4 possuem na sua constituição um conector de chapa lisa do tipo Indentado.

5.1.1 Provetes para o ensaio de viga mista

Na modelação da viga mista definiram-se primeiramente os elementos comuns aos vários provetes, como sejam, a viga metálica, a base dos apoios, as nervuras laterais e a chapa perfilada. Apenas posteriormente é que se modelaram os conectores, porque estes diferem de provete para provete.

De seguida, modelou-se a laje de betão, os elementos de ligação, entre as vigas metálicas e o conector e entre as vigas metálicas e a chapa perfilada, a armadura e a cofragem da laje.

Na Figura 5.1 e na Figura 5.3 é possível visualizar os provetes 1 e 2 e na Figura 5.2 e na Figura 5.4 é possível visualizar estes mesmos provetes mas sem a laje de betão.

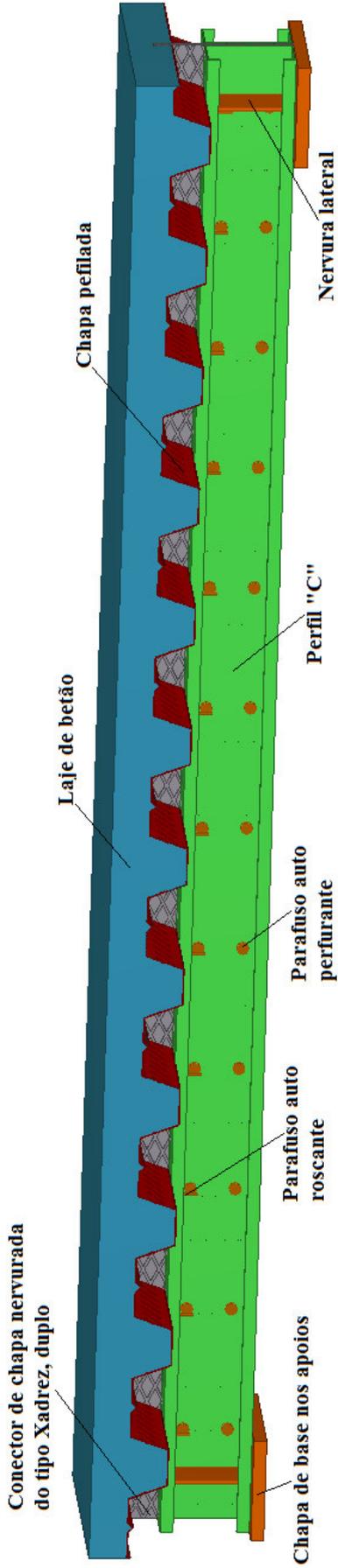


Figura 5.1 - Provete 1, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.

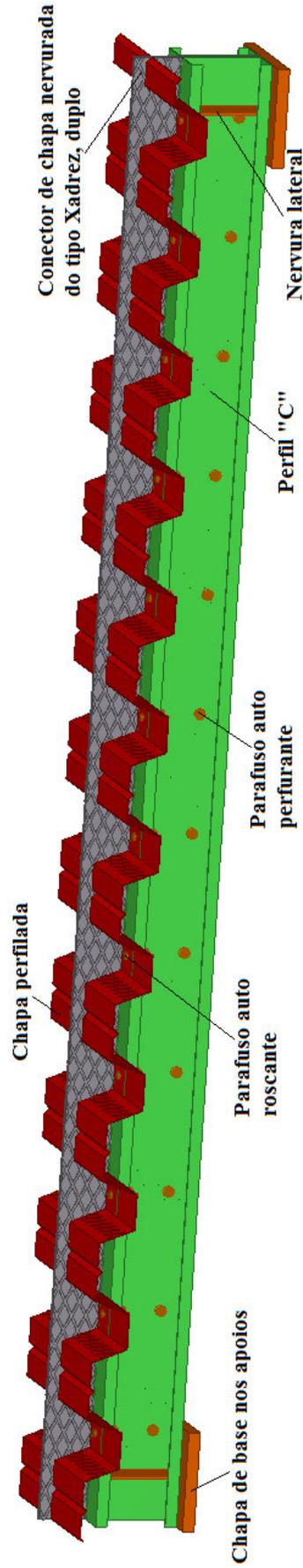


Figura 5.2 - Provete 1 sem laje de betão, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.

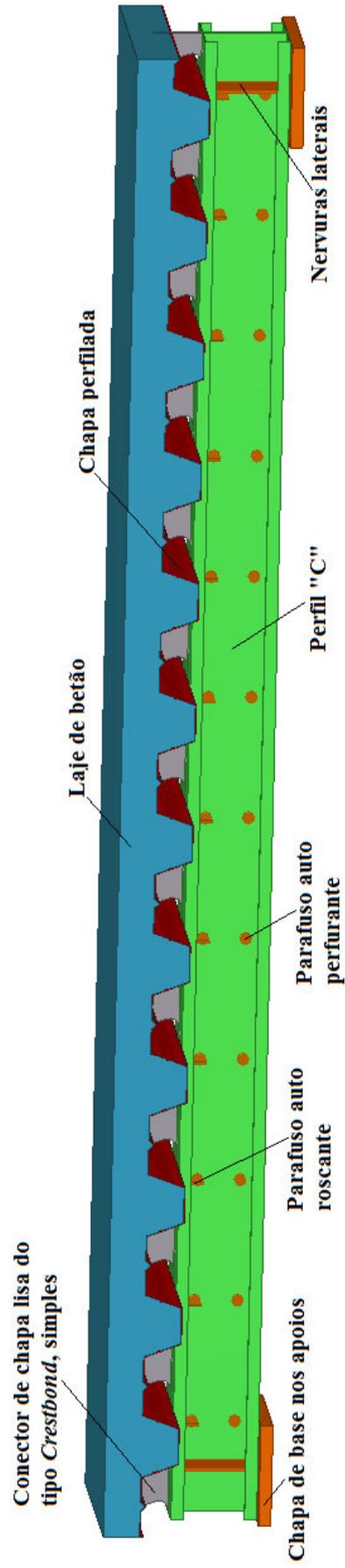


Figura 5.3 - Provete 2, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.

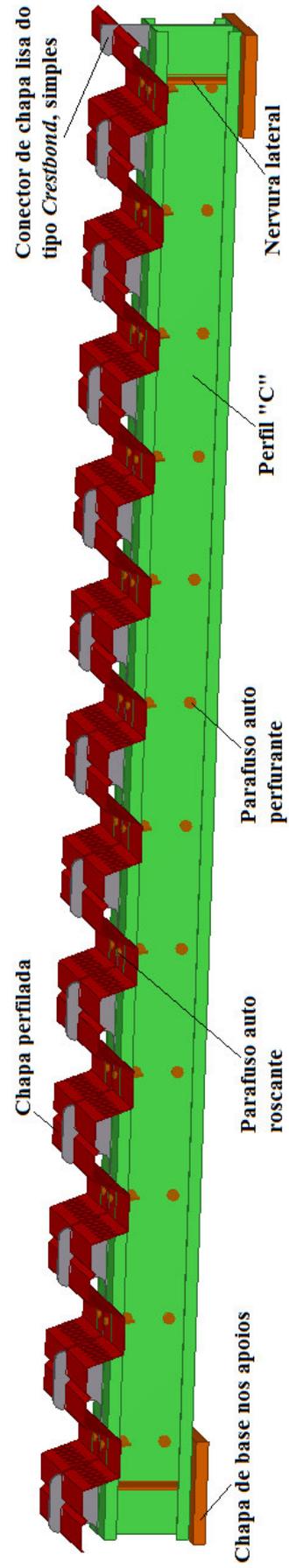


Figura 5.4 - Provete 2 sem laje de betão, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.

5.1.1.1 Viga metálica

Para os provetes 1 e 2 executou-se a modelação da viga metálica correspondente a dois Perfis C 140 × 60 × 2,0, realizado em aço enformado a frio do tipo S280GD+Z. Os perfis estão espaçados entre si com a espessura do respetivo conector a ser colocado posteriormente.

Como se pode verificar na Figura 5.5, o vão da viga é de 2342,1 mm e o seu comprimento total é de 2512,1 mm, pois os 85 mm a mais em cada extremidade correspondem à posição do apoio.

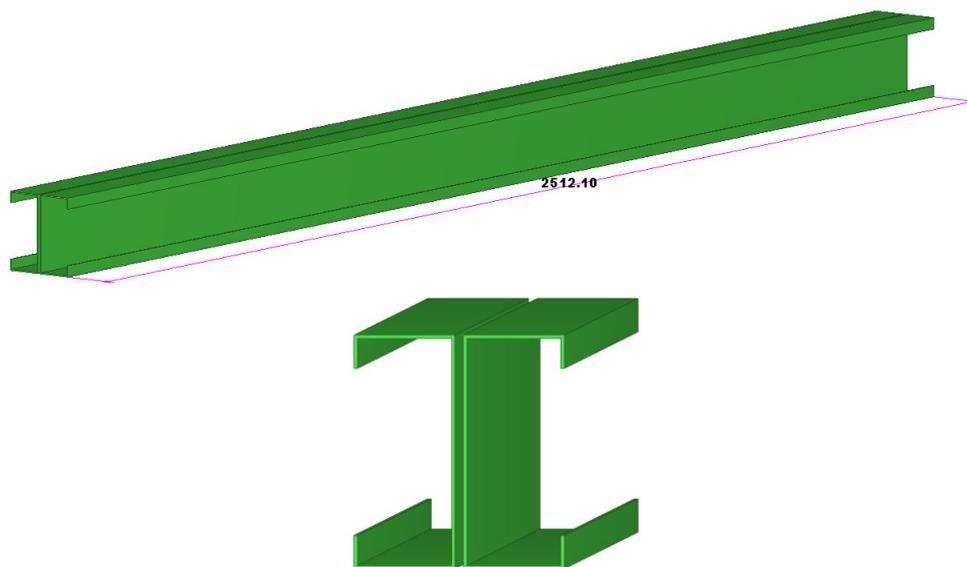


Figura 5.5 - Viga metálica dupla de secção “C”

5.1.1.2 Base e reforço da viga mista

Posteriormente, através do comando “*Create countour plate*” executou-se a modelação das chapas de base posicionadas sob os apoios, de modo a conferir estabilidade nessa localização, e das nervuras laterais que impedem a possibilidade de ocorrência de instabilidade local. As nervuras laterais são de aço do tipo S235 e têm uma espessura de 5 mm. As chapas de base têm uma espessura de 20 mm e também são em aço do tipo S235. Na Figura 5.6 estão representados estes dois elementos, com as correspondentes dimensões, juntamente com a viga metálica.

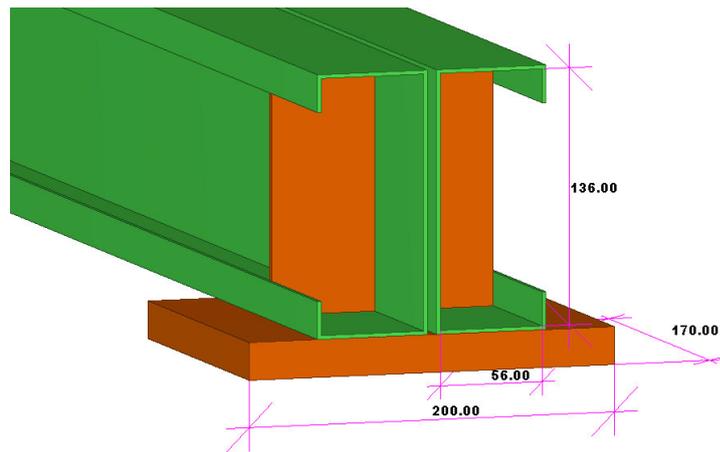


Figura 5.6 - Chapa de base nos apoios e nervuras laterais

5.1.1.3 Conector

Como já foi mencionado, existem dois modelos de conectores diferentes, o conector de chapa nervurada do tipo Xadrez e o conector de chapa lisa do tipo Indentado. O conector do tipo Xadrez é realizado em aço do tipo S235, de acordo com a disponibilidade do mercado, e o conector do tipo Indentado é realizado em aço enformado a frio do tipo S220GD+Z.

Para a modelação destes conectores, executou-se o seu desenho 2D em *AutoCad* e de seguida importou-se o mesmo para o *Software Tekla Structures*. Assim, através do comando “*Create countour plate*” contornou-se os desenhos executados em *AutoCad*, podendo-se deste modo, definir a espessura dos conectores. No caso do conector de chapa lisa do tipo Indentado a espessura é de 5 mm. No caso da chapa nervurada do tipo Xadrez, a sua espessura é de 4 mm mas ainda existe a espessura das ranhuras que é de 2 mm, perfazendo um total de 6mm.

Na modelação do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, inicialmente modelou-se apenas a chapa lisa com 4 mm de espessura, que é a dimensão para lá do plano 2D, só posteriormente é que se modelou as ranhuras diagonais com uma espessura de 2 mm juntando-se por fim as duas partes pelo comando “*Attach to part*”, perfazendo uma só peça com 6 mm de espessura.

Como o conector de chapa nervurada do tipo Xadrez apenas possui nervuras de um dos lados, vai ser necessário colocar dois conectores deste tipo, costas com costas, para se conseguir o efeito pretendido.

No conector de chapa lisa do tipo Indentado, modelou-se o mesmo com os cantos retos e só depois é que se executou o arredondamento dos cantos, ou seja, os chanfros com um raio de 15 mm. Este conector foi desenhado de modo a que os seus dentes coincidisse com as ranhuras da chapa perfilada, mantendo ao máximo a sua simetria, facilitando posteriormente a sua fabricação e betonagem da laje (ver Figura 5.7).

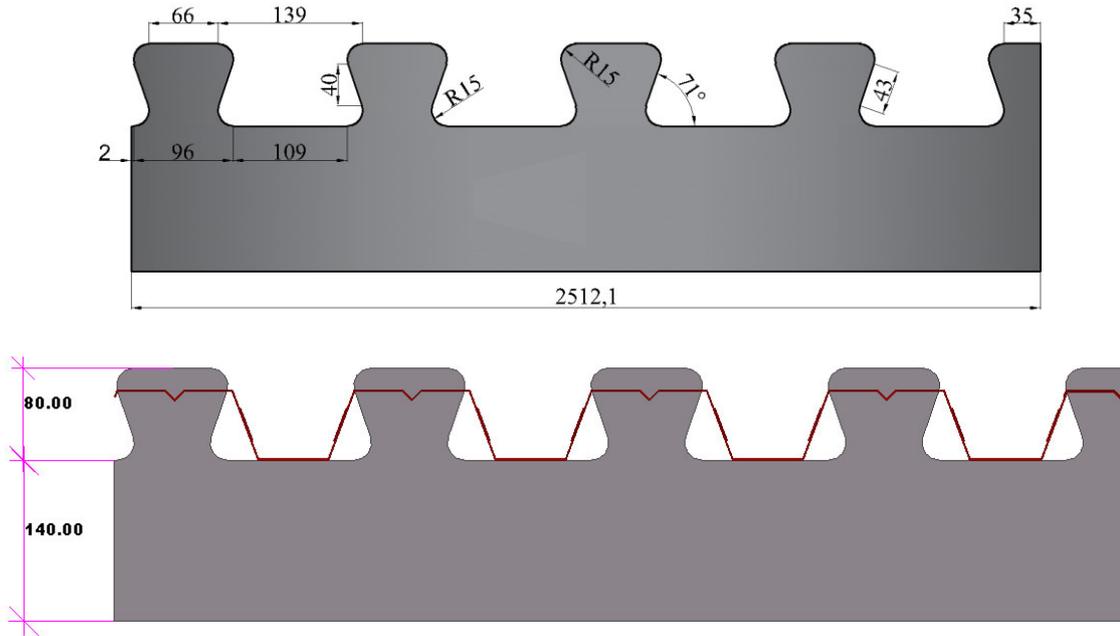


Figura 5.7 - Encaixe do conector de chapa lisa Indentado com a chapa perfilada.

A Figura 5.8 e a Figura 5.9 apresentam o resultado final da modelação dos conectores para os provetes 1 e 2, podendo-se ver as dimensões dos dois conectores (2512,1 mm × 220,0 mm).

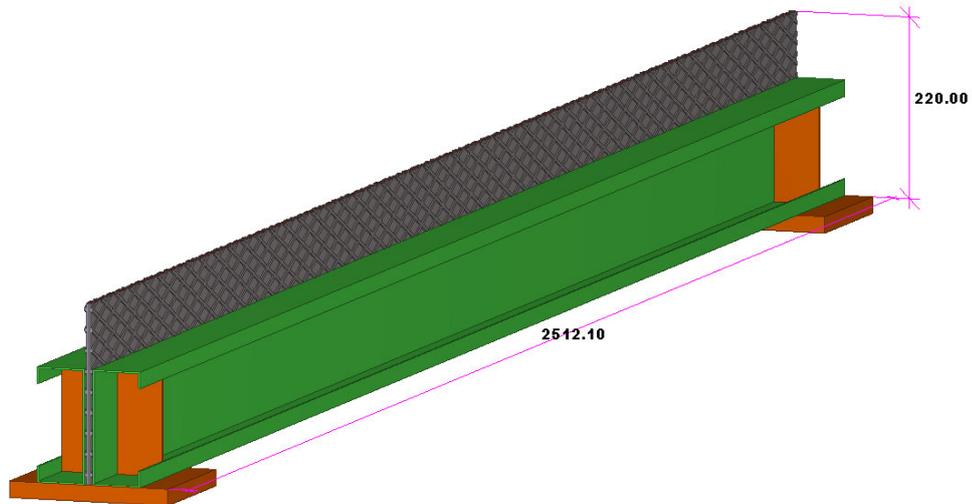


Figura 5.8 - Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.

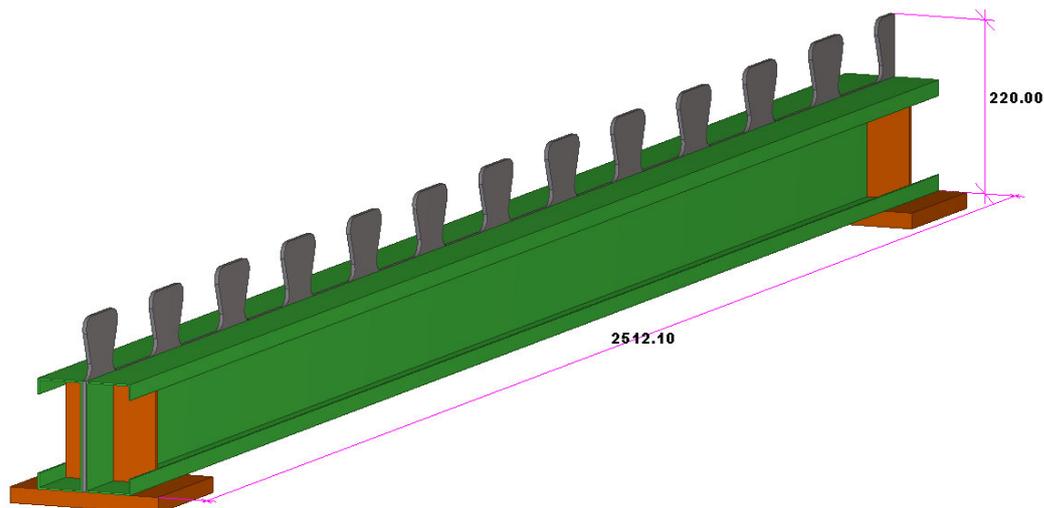


Figura 5.9 - Conector de chapa lisa do tipo Indentado.

5.1.1.4 Chapa perfilada

A chapa perfilada selecionada é a da empresa “O FELIZ”, como já foi referido anteriormente e tem a designação de “Perfil H60” que na ferramenta de cálculo corresponde ao 1PC 60 × 820 × 1,0. A chapa é realizada em aço do tipo S320GD+Z.

Para a modelação da chapa perfilada o processo foi o mesmo que os dos conectores, depois de executado o desenho 2D no *AutoCad* da chapa importou-se os mesmos para o *Software Tekla Structures*. Posteriormente, através do comando mencionado anteriormente contornou-se os desenhos executados em *AutoCad*, podendo-se deste modo, colocar a sua respetiva largura.

Inicialmente, tal como nos conectores, na modelação da chapa perfilada considerou-se apenas a chapa e só depois é que se modelaram as ranhuras da mesma, juntando-se por fim as duas peças (chapa perfilada e ranhuras) pelo comando “*Attach to part*”.

Na Figura 5.10 é possível visualizar a chapa perfilada. Neste caso, foram 3 troços de chapa posicionados em cada lado da viga metálica para perfazer o comprimento total de 2512,1 mm.

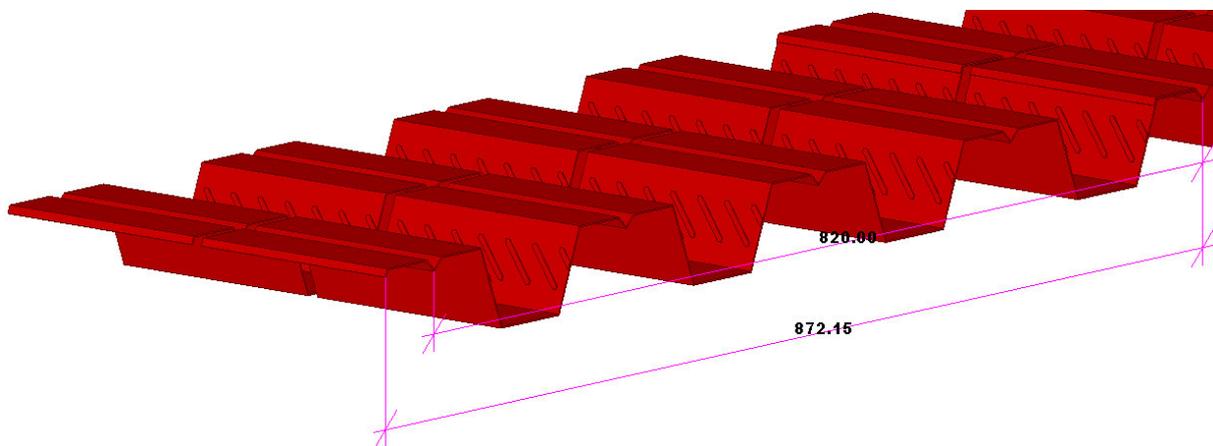


Figura 5.10 - Chapa perfilada.

5.1.1.5 Laje de betão

A laje de betão possui uma altura de 60 mm, uma largura de 350 mm, um comprimento de 2512,1 mm. O betão considerado é da classe C25/30.

A laje modelou-se como um retângulo com uma altura de 120 mm e posteriormente executou-se o corte da mesma de acordo com a configuração da chapa perfilada, através dos comandos “*Cut part with another part*” e “*Cut part with line*”. Na Figura 5.11 é possível visualizar o aspeto final da laje.

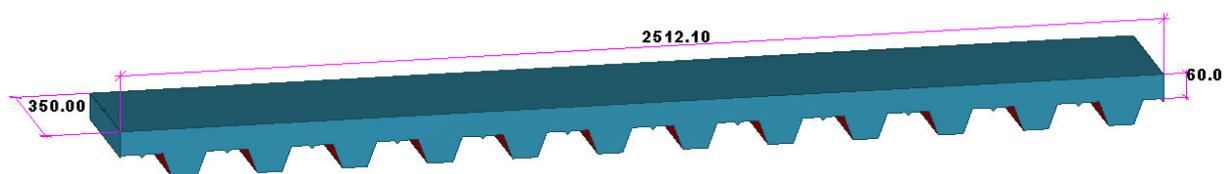


Figura 5.11 - Laje de betão

5.1.1.6 Elementos de ligação

Os elementos de ligação presentes designam-se por parafusos auto roscantes e por parafusos auto perfurantes. Os primeiros têm como função fazer a ligação da chapa perfilada aos perfis “C”, e os segundos têm como função fazer a ligação dos dois perfis em “C” ao conector em questão. Os parafusos auto roscantes encontram-se a uma distância do perfil “C” de 30 mm (metade da dimensão b do perfil) e estão colocados em todas as nervuras da chapa perfilada, ou seja, há a uma distância de 205 mm entre parafusos, fazendo assim a ligação entre a chapa perfilada e o perfil “C”. Os parafusos perfurantes asseguram a ligação dos perfis “C” com o/os conector/conectores e estão a uma distância de 35 mm do bordo do perfil “C” ($h_d/4$) e a uma distância de 205 mm entre parafusos ao longo do comprimento dos perfis “C”, ou seja, estão alinhados com os parafusos auto roscantes (ver Figura 5.12).

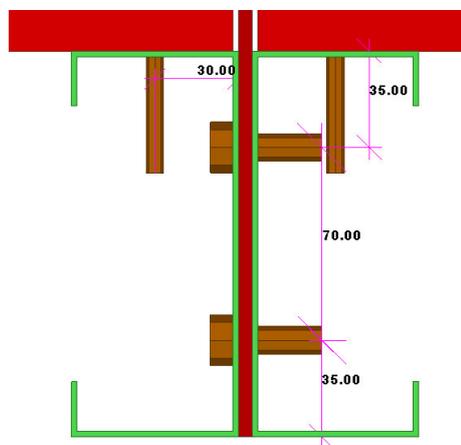
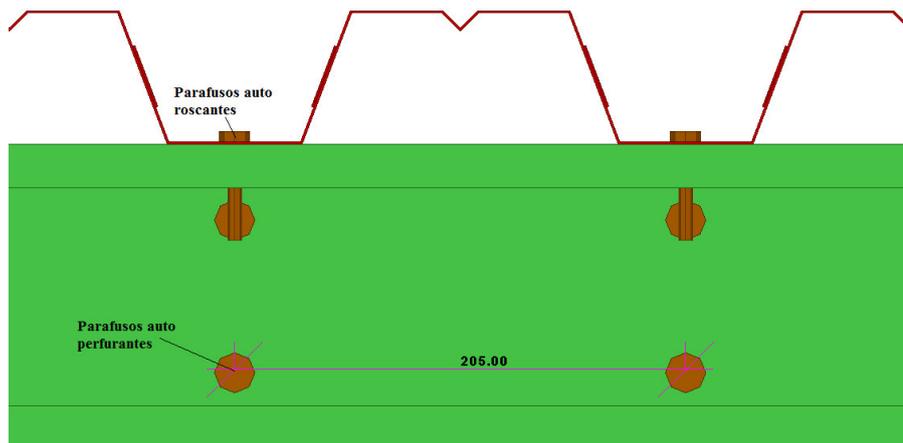


Figura 5.12 - Parafusos auto roscentes e auto perfurantes

5.1.1.7 Armadura

A armadura realizada no *Software* é uma malha sol que será representada em retângulos com um comprimento total de 2362,1 mm e uma largura total de 300 mm.

Após pesquisa sobre a disponibilidade do mercado, a malhas sol selecionada foi a seguinte: $\phi 8//0,100$ na direção transversal e de $\phi 6,5//0,150$ na direção longitudinal.

Esta malha sol foi efetuada utilizando o comando “*Create reinforcement mesh*” do *Software Tekla Structures*, que é um comando manual para a realização das armaduras, onde se colocou então os diâmetros de 8 e 6 mm. A cada armadura são adicionados mais 2 mm de diâmetro, pelo próprio *Software*, de modo a representar o espaço ocupado pelas pequenas ranhuras da armadura.

Na Figura 5.13 e na Figura 5.14, é possível visualizar a armadura realizada no *Software Tekla Structural*, com vista em planta e em vista transversal, respectivamente.

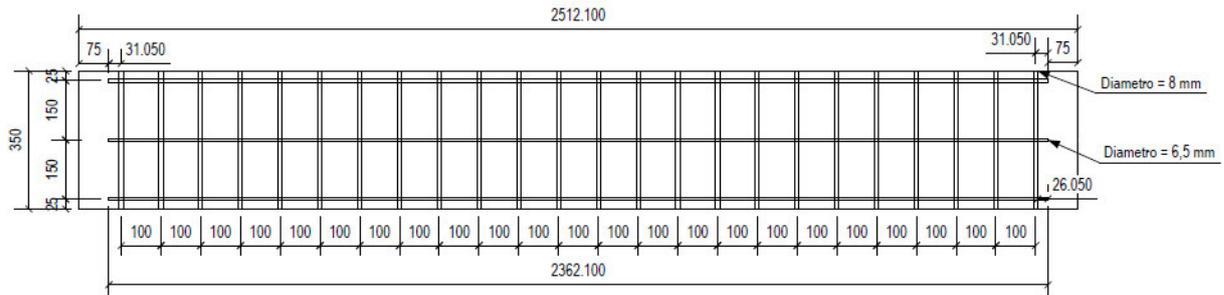


Figura 5.13 - Disposição em planta da armadura realizada no *Software Tekla Structural*.

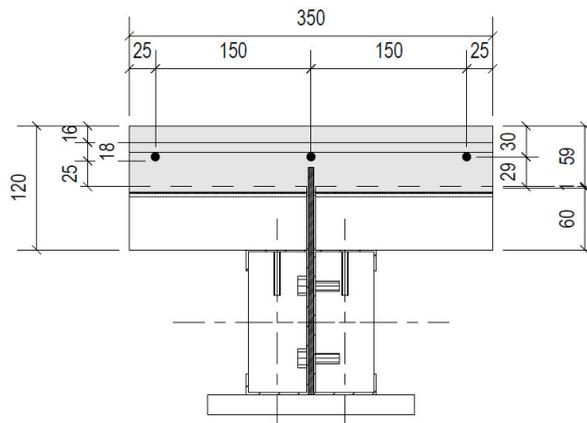


Figura 5.14 - Disposição transversal da armadura realizada no *Software Tekla Structural*.

5.1.1.8 Cofragens

As cofragens são realizadas em MDF Hidrófugo para não absorverem a água do betão durante a betonagem. Por questões económicas e de disponibilidade corrente do mercado, decidiu-se utilizar uma espessura de MDF Hidrófugo de 19 mm.

Como as cofragens dos provetes 1 e 2 são bastante longas, optou-se por colocar travamentos laterais em forma de “L” de forma a evitar a deformação das mesmas após a colocação o betão. Estes travamentos são presos nas nervuras das chapas perfiladas por parafusos, existindo sempre duas aberturas da chapa perfilada de intervalo entre eles. Os travamentos ficam desencostados da chapa perfilada da laje, com o espaço da espessura das cofragens, para de seguida se colocar as cofragens por encaixe, no respetivo espaçamento (ver Figura 5.17).

Também as cofragens laterais desses mesmos provetes vão possuir os travamentos em forma de “L”, pois a altura das cofragens ainda é relevante. No entanto, estes vão ser presos aos perfis em “C” (um travamento por perfil, posicionado no centro da largura do banzo superior) e não às chapas perfiladas. Como os travamentos vão estar presos por parafusos aos perfis “C”, isto significa, que a altura da cofragem tem de aumentar 2 mm em relação à cofragem anterior, ou seja, aumenta com a espessura dos perfis “C”. Estas cofragens, também como nas anteriores, ficarão presas por encaixe, ou seja, os travamentos ficarão desviados da laje por 19 mm, ficando a cofragem apenas pousada nestes travamentos (ver Figura 5.15).

Pretende-se deste modo, economizar ao máximo no material e simplificar o processo de desmontagem das cofragens, pois estas não estão diretamente presas aos travamentos.

Os travamentos com forma de “L” são uma ferramenta já disponível no mercado, fácil de encontrar, são bastante leves e com preço acessível. Possuem uma dimensão de 100 mm de comprimento, de 19 mm de largura e de 2 mm de espessura e ainda são constituídos por furos de 5 mm, o que facilita a colocação dos parafusos (ver Figura 5.16).

Na Figura 5.17 é possível visualizar a disposição dos travamentos e da cofragem para os provetes 1 e 2.

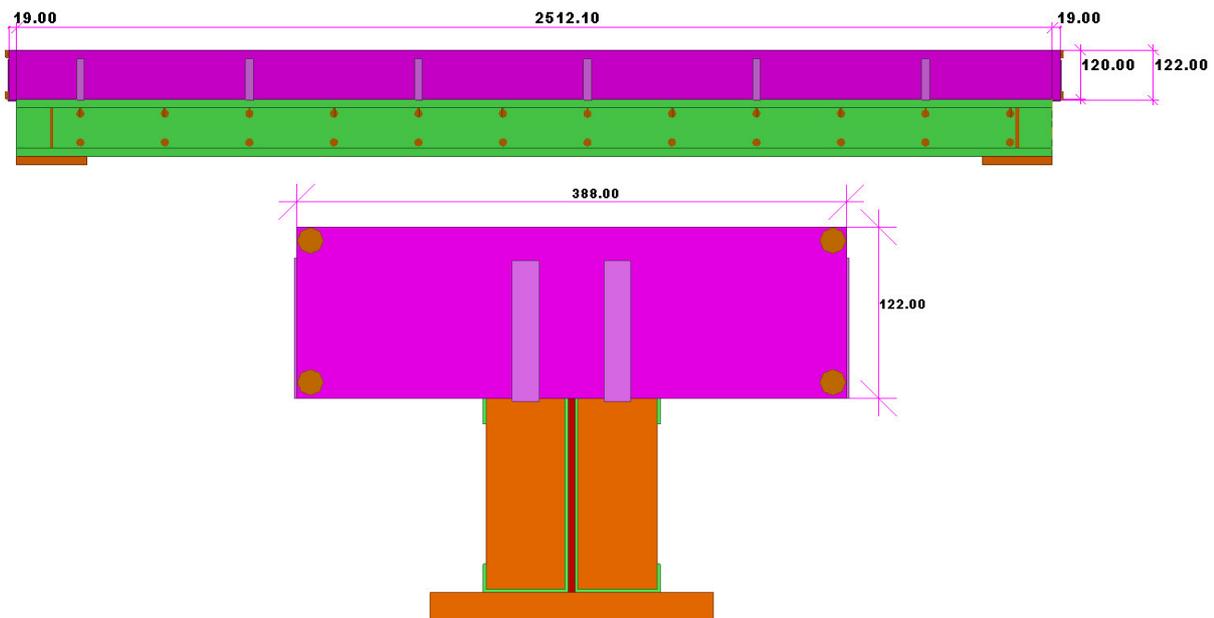


Figura 5.15 – Disposição e medidas das cofragens.

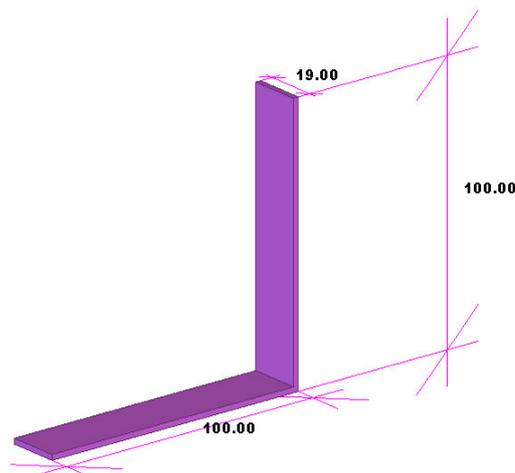


Figura 5.16 – Medidas dos travamentos com forma de “L”.

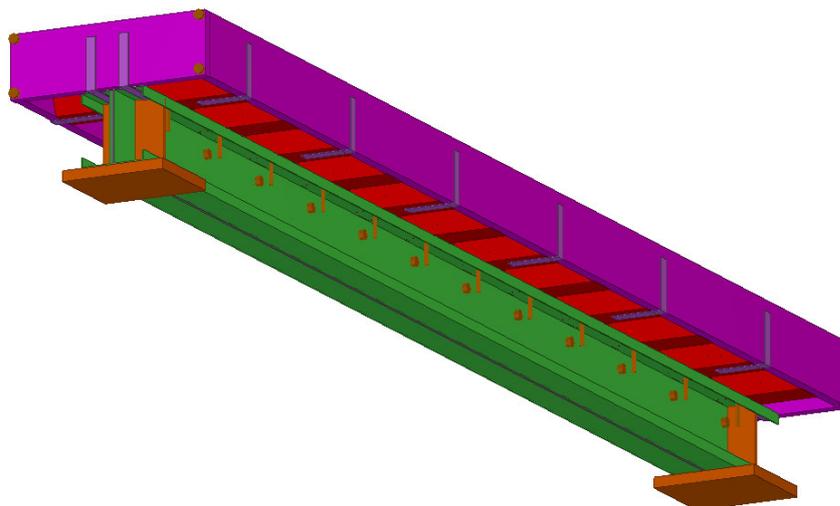


Figura 5.17 – Disposição das cofragens com os travamentos em forma de “L”.

5.1.2 Provetes para o ensaio *push-out*

Na construção do modelo do ensaio *push-out* seguiram-se as indicações do Anexo B da NP EN 1994-1-1: 2011. Posto isto, selecionou-se o perfil metálico HEB 260 com uma altura de 560 mm para o provete 3 e de 600 mm para o provete 4, e respeitaram-se as medidas normalizadas da laje, em largura (600 mm) e altura (650 mm). A espessura da laje não foi igual a 150 mm, como estava definido no documento, mas sim a 120 mm para o provete 3 e a 130 mm para o provete 4, reproduzindo-se assim as características da viga mista. O provete 4 possui 10 mm a mais do que o provete 3, pois o conector de chapa lisa do tipo Indentado possui mais 10 mm, para que posteriormente se possa executar a soldadura sem que ocorra deformações do conector.

Na Figura 5.18 e na Figura 5.19 é possível visualizar os provetes 3 e 4, respetivamente.

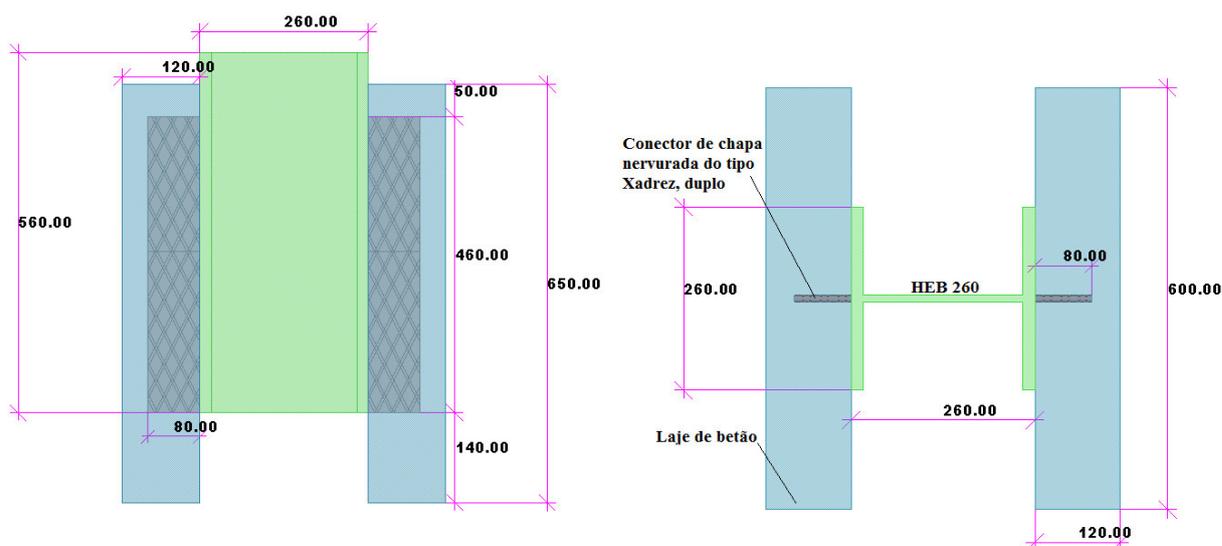


Figura 5.18 - Provede 3, com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.

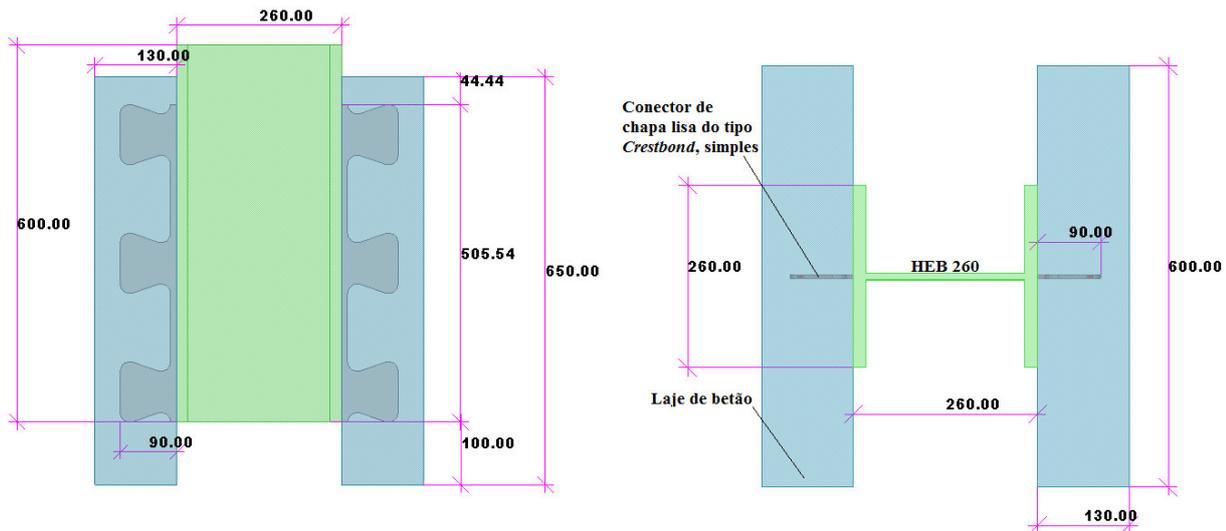


Figura 5.19 - Provete 4, com conector de chapa lisa do tipo Indentado.

5.1.2.1 Perfil metálico

O perfil metálico utilizado nos provetes 3 e 4 é um HEB 260.

Este perfil possui uma altura variável de um provete para outro. Assim, impondo para o provete 3 uma altura de 140 mm da laje de betão até ao início do conector, fez com que a altura do perfil fosse de 560 mm (ver Figura 5.20(a)). Para o provete 4 impôs-se uma altura de 100 mm, de modo a que o conector do tipo Indentado tivesse o maior número de "dentes" possível, ficando assim o perfil HEB 260 do provete 4 com 600 mm (ver Figura 5.20(b)).

Decidiu-se ainda, que o perfil HEB 260 começava, a partir da medida que o conector também se iniciava.

O tipo de aço deste perfil é um S275, por ser o mais próximo do S280 GD+Z dos perfis "C".

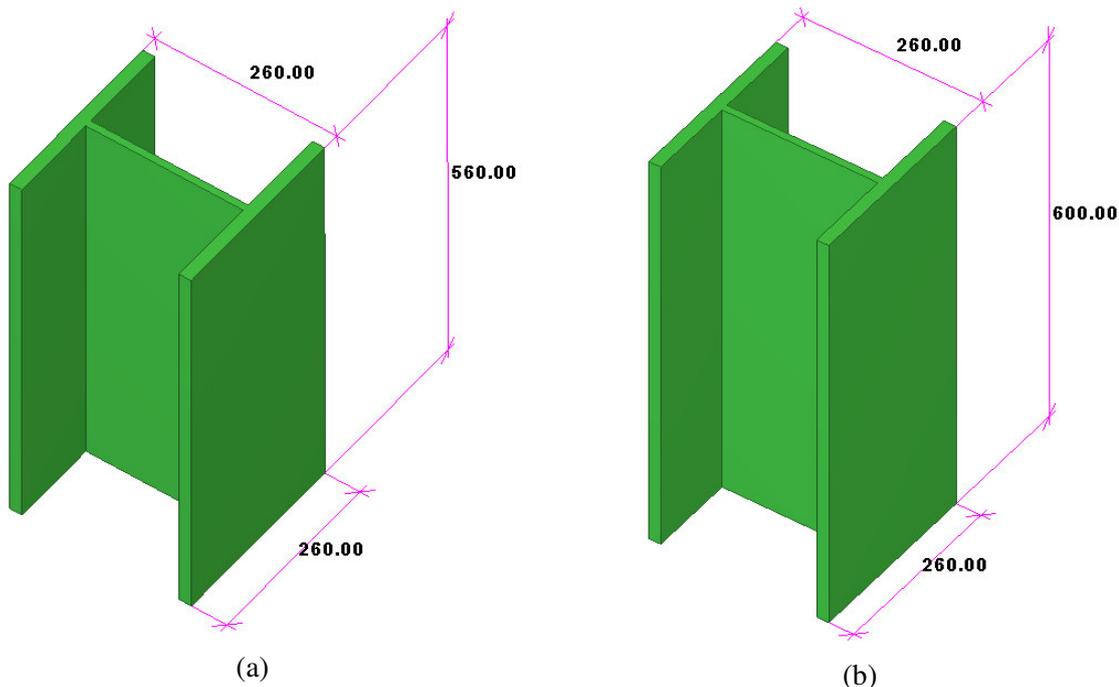


Figura 5.20 – Perfil HEB 260: (a) Provete 3; (b) Provete 4.

5.1.2.2 Conector

O conector de chapa nervurada do tipo Xadrez apresenta uma altura de 80 mm, sendo esta medida a altura de conector que está embebida na laje de betão da viga. A respetiva espessura é de 6 mm, igual à medida do conector das vigas mistas, fazendo um total de 12 mm de chapa, já que este conector é composto por duas chapas soldadas, posicionadas costas com costas. O comprimento total deste conector é de 460 mm.

O conector de chapa lisa do tipo Indentado apresenta uma altura de 90 mm, isto deve-se à espessura demasiado reduzida deste conector para se realizar a soldadura sem deformação do mesmo, portanto em vez de 80 mm optou-se por acrescentar mais 10 mm para garantir a sua segurança. A espessura do conector Indentado é de 5 mm, tal e qual à espessura do mesmo nas vigas mistas, e a sua altura é de 505,5 mm para que as ranhuras sejam em maior número, fazendo assim um total de aproximadamente 600 mm quando somada esta medida com os 10 mm que vão desde a laje de betão até ao conector.

O aço do conector Xadrez é do tipo S235 e o aço do conector Indentado é do tipo S220 GD+Z, de acordo com a disponibilidade corrente do mercado.

A Figura 5.21 apresenta os conectores dos provetes 3 e 4 com as respetivas dimensões e a Figura 5.22 representa os conectores soldados no perfil HEB 260.

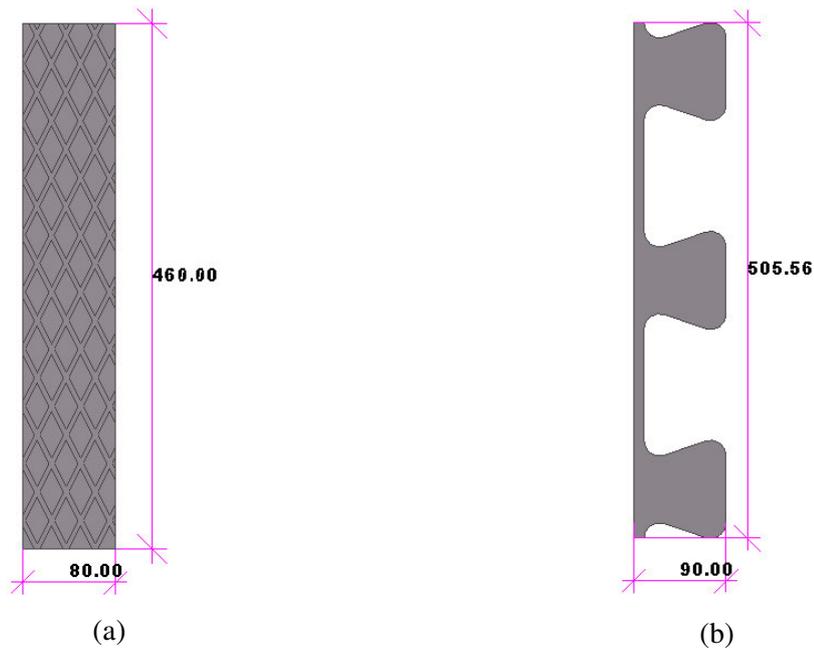


Figura 5.21 - Conectores dos provetes 3 e 4: (a) Provete 3: Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez; (b) Provete 4: Conector de chapa lisa do tipo Indentado.

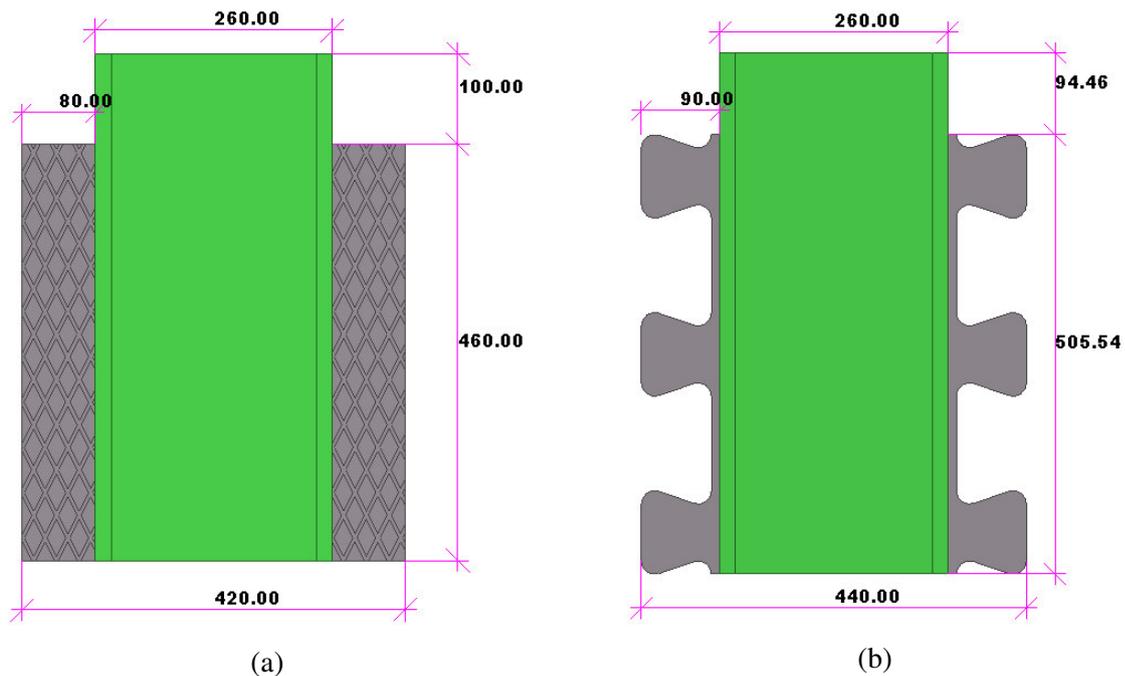


Figura 5.22 – Provete 3 e 4 sem laje de betão.: (a) Provete 3: Conector de chapa nervurada do tipo Xadrez; (b) Provete 4: Conector de chapa lisa do tipo Indentado.

5.1.2.3 Laje de betão

laje de betão possui uma altura de 650 mm e uma largura de 600 mm, como define o Anexo B do documento NP EN 1994-1-1: 2011, e o seu betão é de classe C25/30.

No provete 3 possui ainda uma espessura de 120 mm e uma altura abaixo do conector de 140 mm (ver Figura 5.23(a)). No provete 4 possui uma espessura de 130 mm, mais 10 mm do que o provete 3 por o seu conector possuir também mais 10 mm do que o conector do provete 3, e uma altura a baixo do conector de 100 mm, devido ao conector deste ser mais comprido (ver Figura 5.23(b)).

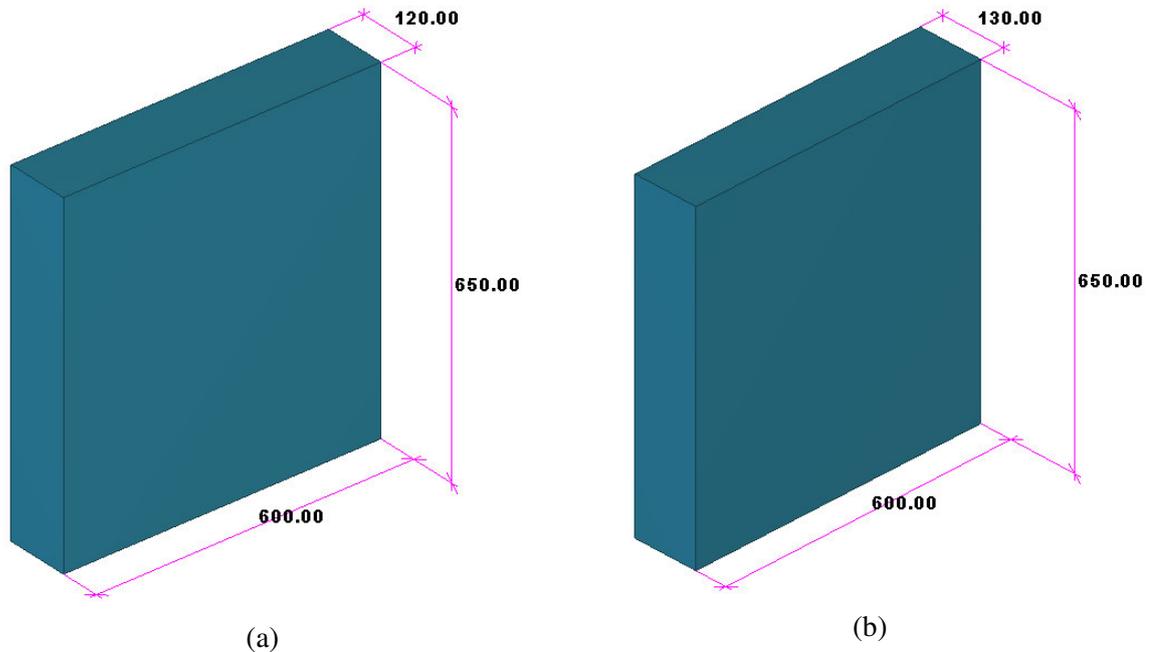


Figura 5.23 – Laje de betão dos provetes push-out: (a) Provete 3; (b) Provete 4.

5.1.2.4 Armadura

Esta armadura foi modelada exatamente da mesma forma que nas vigas mistas, a única diferença está na sua dimensão, pois nestes provetes esta malha sol possui um comprimento total de 600 mm e uma largura total de 550 mm, contudo os diâmetros mantêm-se os mesmos, com o objetivo de retratar o mais possível as vigas mistas.

A Figura 5.24 apresenta a disposição da malha sol para os provetes 3 e 4.

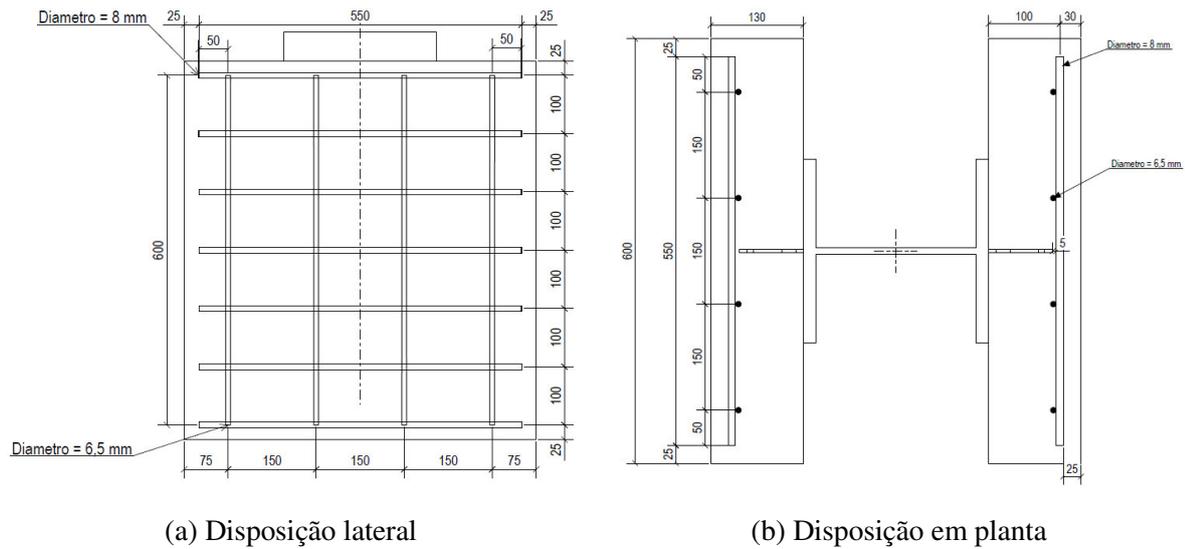


Figura 5.24 - Disposição da armadura para os provetes 3 e 4.

5.1.2.5 Cofragens

As cofragens para os provetes dos ensaios *push-out* (provete 3 e provete 4) serão realizadas também em MDF Hidrófugo, pelas razões já explicadas anteriormente. Estas não terão uma espessura de 19 mm como no caso dos provetes das vigas mistas, mas sim de 22mm, de modo a reaproveitar as cofragens já existentes de ensaios anteriores (ver Figura 5.25 e Figura 5.26).

Na Figura 5.27 é possível visualizar a cofragem dos provetes 3 e 4 através de uma perspetiva tridimensional.

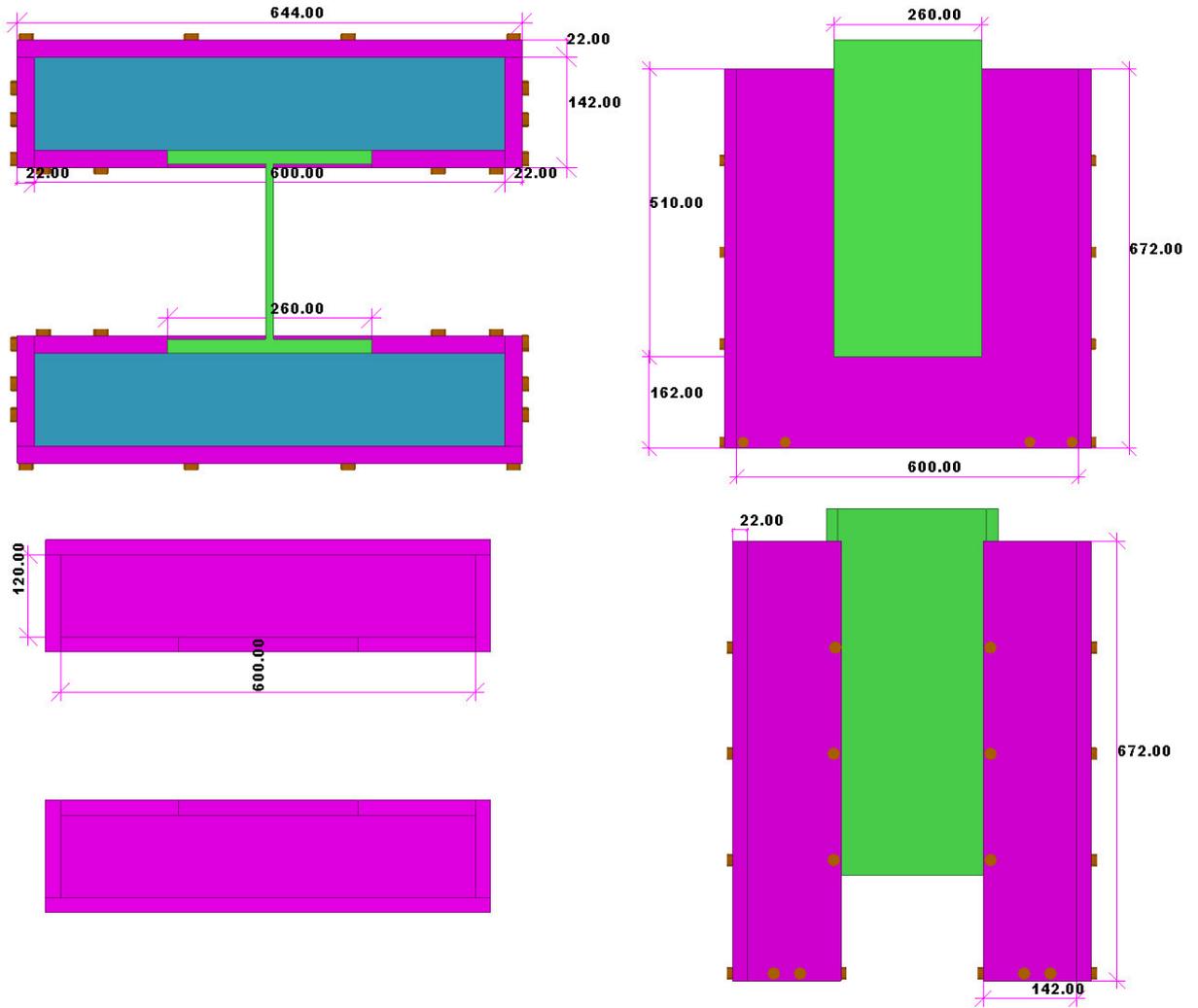


Figura 5.25 – Cofragem para o Provete 3.

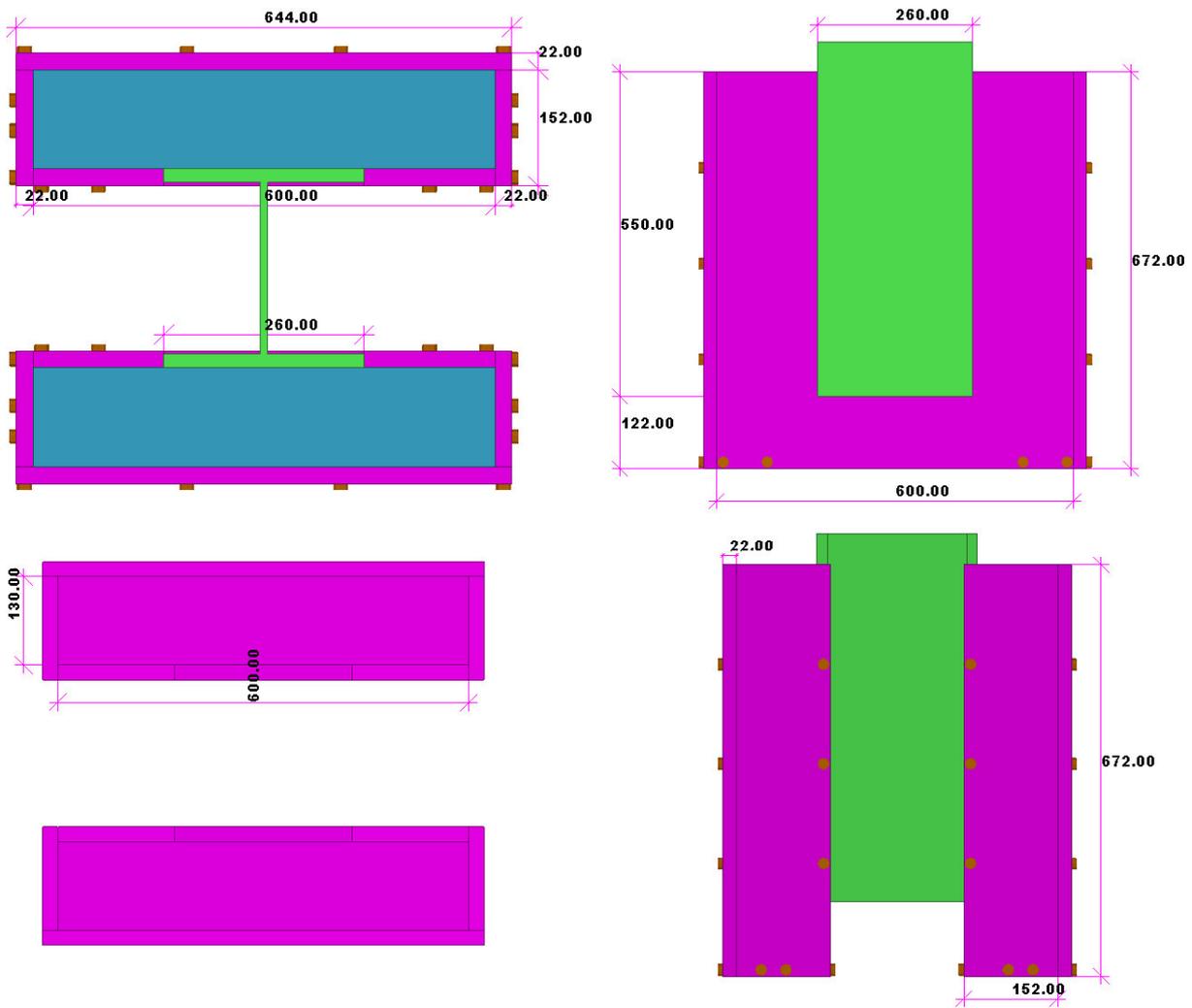


Figura 5.26 – Cofragem para o Provete 4.

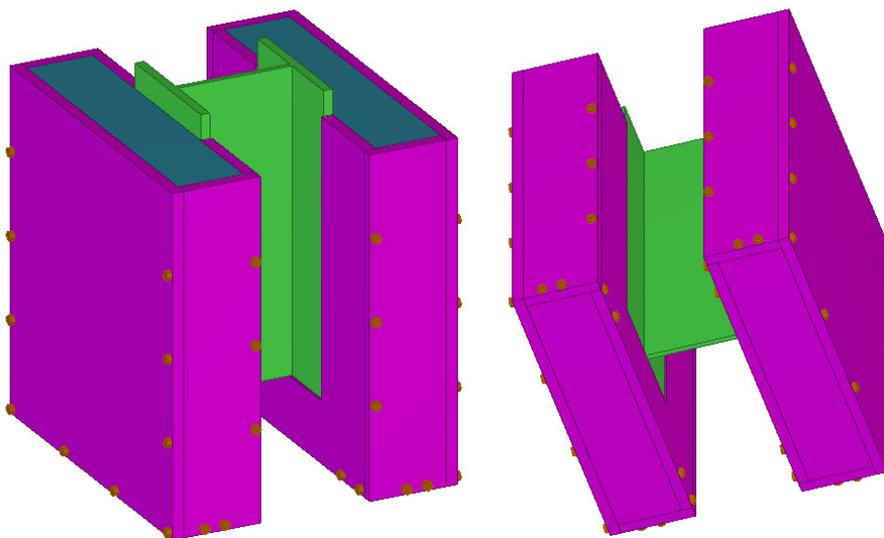


Figura 5.27 – Imagem 3D da cofragem dos Provetes 3 e 4.

5.2 Produção

5.2.1 Desenhos dos provetes

Com o propósito da fabricação dos provetes, foram gerados desenhos automáticos no *Software Tekla Structures*, onde, a empresa O FELIZ pode encontrar o modelo 3D desenvolvido e todos os detalhes mencionados nos desenhos.

Foram desenvolvidos desenhos, para cada um dos provetes, dos alçados, dos conectores e de alguns pormenores construtivos, como a sobreposição das chapas perfiladas e as dimensões do conector de chapa Indentado. Para cada provete criaram-se dois desenhos distintos, um com todas as características do provete e outro apenas com as características do conector em questão, facilitando deste modo a respetiva leitura (ver Anexo VI).

Os desenhos foram criados e alterados a partir do modelo 3D do *Software Tekla Structures* e, depois de concluídos, foram exportados para o formato PDF, de modo a que qualquer utilizador pudesse visualiza-los, mesmo sem ter o *Software* onde foram criados.

Após produção dos provetes é possível verificar que estes estão de acordo com as exigências pretendidas, isto é, que os provetes se encontram em concordância com os desenhos e os modelos 3D aqui mencionados e enviados para a empresa.

Na Figura 5.28 é possível visualizar o provete 2 produzido para o ensaio à flexão. Na Figura 5.29 é possível verificar os pormenores construtivos das chapas metálicas e das ligações através dos parafusos auto perfurantes e auto roscantes. Na Figura 5.30 podem-se observar os provetes 1 e 2 em vista transversal e na Figura 5.31 mostram-se os provetes 3 e 4 destinados a ensaios do tipo *push-out*.



Figura 5.28 – Provette 2 com conector de chapa lisa do tipo Indentado, para ensaio.



(a)



(b)

Figura 5.29 – Pormenores construtivos: (a) Soldadura das chapas metálicas; (b) Parafusos auto roscantes e auto perfurantes.



Figura 5.30 - Vista transversal dos Provetes 1 e 2.



Figura 5.31 – Provetes para o ensaio *push-out*: (a) Provete 3; (b) Provete 4.

Na Figura 5.29(b) é possível verificar que a empresa responsável pela produção dos provetes, acrescentou um parafuso auto roscante na sobreposição das chapa perfiladas, pormenor este que não tinha sido mencionado nos desenhos. Isto deve-se à junção dos fatores leveza e espessura reduzida da chapa perfilada, que fazem com que a chapa tenha tendência a levantar nas zonas das sobreposições.

Na Figura 5.32 pode-se visualizar a malha sol encomendada para posterior colocação na laje do sistema misto. Como se pode verificar pela Figura 5.33, primeiramente houve o cuidado de se marcar a malha com as medidas pretendidas, de modo a economizar a quantidade de desperdícios e posteriormente procedeu-se ao corte da malha sol, pelas marcações.



Figura 5.32 – Malha sol de $\phi 8//0,100$ transversalmente e de $\phi 6,5//0,150$ longitudinalmente.



Figura 5.33 – Marcação e corte da malha sol.

5.2.2 Análise de quantidades

A partir do *Software Tekla Structures*, exportou-se ainda o mapa de quantidades de cada provete, para o formato XLS, ou seja para o *Software Microsoft Excel*. No *Excel* procedeu-se às alterações que se julgaram necessárias, sendo as mais relevantes a colocação dos volumes, pesos e a quantidade de provetes a serem fabricados (ver Anexo VII).

Por uma questão de confirmação de resultados, optou-se por fabricar o mesmo provete duas vezes (proвете 1 e 2), assim quando se realizar o ensaio pode-se comparar os resultados do comportamento estrutural dos mesmos. Os provetes do ensaio *push-out* (proвете 3 e 4) serão fabricados três vezes, pelas mesmas razões já referidas.

Este mapa de quantidades foi enviado para a empresa responsável pela produção dos provetes, mas também tem vantagens no presente estudo na medida que, permite realizar uma análise das quantidades de aço despendidas.

Através do Anexo VII, é possível verificar que os pesos totais obtidos para os provetes 1, 2, 3 e 4 foram, respetivamente, de 71,56 kg, 55,85 kg, 57,22 kg e de 55,65 kg. Se retiramos o peso das chapas metálicas, pois estas só estão presentes devido às particularidades dos ensaios, não sendo aplicadas num caso em obra, os provetes 1 e 2 ficam com os seguintes pesos: 59,69 kg e 43,98 kg.

Assim sendo, o provete que se mostra mais pesado e portanto mais dispendioso é o 1, devido ao conector de chapa nervurada do tipo Xadrez que acrescenta um peso bastante elevado comparativamente com o conector de chapa lisa do tipo Indentado. A diferença de peso entre os dois conectores de 15,70 kg.

No estudo desenvolvido pretendia-se estudar soluções apenas em aço leve, mas devido à disponibilidade do mercado e ao tempo que se iria esperar para a fabricação de uma chapa em aço leve com nervuras tipo Xadrez, isto não foi possível. Assim, decidiu-se optar por uma chapa com nervuras dispostas em xadrez, já disponível no mercado, podendo-se deste modo realizar os ensaios o mais rapidamente.

6.1 Considerações finais

A presente dissertação teve como objetivo analisar um sistema misto inovador para pavimentos de edifícios, onde se associa uma laje mista com chapa perfilada nervurada a uma viga metálica do tipo I-enrijecida, obtida a partir de perfis metálicos enformados a frio. No desenvolvimento do trabalho, procurou-se dar relevo à utilização de dois modelos de conectores diferentes: chapa nervurada do tipo Xadrez e chapa lisa do tipo Indentado.

Através de uma análise paramétrica, foram selecionados dois modelos de viga mista com geometria similar para avaliar o comportamento do sistema proposto. Essa análise paramétrica foi efetuada tendo por base uma Ferramenta de Cálculo especialmente desenvolvida para o efeito. O enfoque do trabalho é colocado no sistema de conexão entre a viga metálica e a laje mista, pelo que as diferenças entre modelos se centram na geometria e no material do conector. Para efeitos de comparação, a análise paramétrica considerou ainda outros dois provetes de geometria semelhante, mas com laje maciça, de modo a avaliar as diferenças de funcionamento entre estes e os provetes de laje nervurada. Após construção dos modelos numéricos destes quatro provetes, realizou-se uma análise de sensibilidade com o intuito de prever o comportamento real destes sistemas mistos durante a realização de um ensaio. Para tal, foram assumidos valores razoáveis e expectáveis, recolhidos da bibliografia, para as propriedades dos vários materiais envolvidos e para os parâmetros que condicionam o comportamento do sistema.

Com a concretização da análise paramétrica, desenvolvida com base na ferramenta de cálculo, foi possível concluir que:

- o sistema misto apresenta uma maior resistência à flexão e conseqüentemente uma menor deformação, com o aumento da espessura e/ou da largura da laje maciça, com o aumento da geometria e/ou tensão de cedência do perfil “C” e com o aumento da altura e/ou espessura da chapa do conector;
- a profundidade do eixo neutro do sistema aumenta com a diminuição da espessura e/ou largura da laje de betão, com o aumento das dimensões e/ou tensão de cedência do perfil “C” e com o aumento da espessura da chapa do conector;

- para as mesmas características, o sistema misto com laje maciça apresenta maior capacidade resistente à flexão do que o sistema misto com laje nervurada;
- as tensões máximas no aço diminuem com o aumento das dimensões do perfil “C” e da espessura do conector e com a diminuição da espessura da laje de betão;
- as tensões máximas no betão diminuem com o aumento da largura e/ou espessura da laje, com o aumento das dimensões do perfil “C” e com o aumento da espessura da chapa do conector;
- o esforço rasante diminui com a diminuição da largura e/ou espessura da laje de betão e com o aumento da geometria do perfil “C”.

Nota-se ainda que as variáveis e os coeficientes utilizados no cálculo da resistência ao corte do conector Xadrez e do conector Indentado, necessitam de ensaios para uma melhor calibração.

Com a análise de sensibilidade realizada aos vários modelos numéricos, pode-se concluir que:

- os modelos com laje nervurada e conector Xadrez apresentam uma possível rotura por corte na superfície de ligação entre o conector e a laje de betão, pois as fendas existentes na laje de betão para a carga máxima mostram um desenvolvimento nos contornos do conector ao longo de todo o comprimento da viga. Também as tensões principais máximas de tração no conector se apresentam muito elevadas, o que conduz à plastificação parcial do mesmo. Através da análise da superfície de ligação entre a laje de betão e o conector Xadrez consta-se que a carga máxima e o modo de rotura são condicionados pela ligação destes dois elementos;
- nos modelos com laje maciça e conector Xadrez, as fendas apresentadas indicam uma possível rotura por esmagamento do betão na zona a meio vão, nomeadamente entre os pontos de aplicação de carga. No entanto, com a análise das tensões principais máximas, verifica-se que há plastificação do conector Xadrez, devido às tensões principais máximas de tração se apresentarem muito elevadas, o que indica que a rotura não será por esmagamento do betão, mas sim por corte na zona de ligação entre o conector e a laje de betão. Este modo de rotura, vai de encontro com os resultados obtidos na Ferramenta de Cálculo, na medida em que o conector Xadrez não apresenta capacidade resistente ao corte suficiente para a carga máxima;
- ambos os modelos, com laje maciça e laje nervurada, e conector Indentado, mostram uma possível rotura pelos “dentes” do conector, devido à flexão dos “dentes” provocada pelo deslizamento da laje de betão em direção aos apoios. Deste modo, os “dentes” do conector vão ter tensões máximas de compressão nas zonas do lado dos apoios e tensões máximas de tração nas zonas do lado do ponto de aplicação de carga.

Conclui-se ainda que, se o modelo com laje nervurada e conector Xadrez apresentar uma coesão e rigidez baixas, isto é, $C \leq 4$ MPa e $K_f \leq 11,0 \times 10^3$ MN/m³, o modelo com laje nervurada e conector Indentado possuirá uma carga máxima e rigidez superiores. Deste modo, a utilização

de um conector do tipo Indentado será mais vantajosa, pois o sistema apresentará uma capacidade resistente superior, será mais leve e portanto o custo que lhe é associado será menor.

Verifica-se que, a capacidade de carga do modelo com laje maciça e conector Indentado não é muito superior à capacidade de carga do modelo com laje nervurada e conector Indentado, logo torna-se mais vantajosa a utilização de um sistema com laje nervurada, pelas razões já referidas no ponto 2.5 do Capítulo 2.

Por fim, efetuou-se a modelação 3D dos provetes de laje nervurada com detalhe da armadura e cofragem, que simulam a preparação dos mesmos para ensaios a realizar futuramente. Estes modelos servem de apoio ao fabrico das peças metálicas, à colocação de armaduras, ao fabrico e colocação de cofragens, à betonagem e ainda à montagem do *setup* dos ensaios e realização dos mesmos.

Com a modelação 3D, confirma-se que a construção dos sistemas mistos com laje nervurada e conector do tipo Indentado e do tipo Xadrez é possível. Verifica-se também que, a utilização de uma malha sol simplifica bastante o processo de montagem da armadura na laje e que o sistema de cofragem especialmente desenvolvido para estas soluções mistas apresenta uma montagem relativamente simples e eficaz.

Através dos pesos contabilizados para os provetes 1 e 2, verifica-se que a leveza destes sistemas não só resulta em vantagens a nível económico, mas também acarreta uma redução de mão-de-obra, podendo até mesmo acelerar os trabalhos de montagem deste sistemas em obra.

6.2 Desenvolvimentos futuros

A presente dissertação focou-se na análise de sistemas mistos em aço enformado a frio, tendo como principal componente de estudo a conexão entre a laje de betão e a viga metálica. A conexão estudada seguiu duas tipologias diferentes, uma com conector de chapa lisa Indentada do tipo Indentado e outra com conector de chapa nervurada do tipo Xadrez. Para concluir se a utilização destes dois tipos de sistemas mistos são viáveis em obra, será necessário continuar a pesquisar e a analisar o desempenho destes tipos de conexão.

Com o estudo realizado levantam-se várias questões e temas que merecem ser considerados em trabalhos futuros, de entre os quais se mencionam os seguintes:

- Realização de ensaios à flexão e do tipo *push-out* com os provetes já fabricados. Efetuando, deste modo a calibração dos modelos numéricos aqui desenvolvidos e comparando os resultados dos ensaios com os resultados aqui obtidos, tanto nos modelos numéricos como na Ferramenta de Cálculo desenvolvida;

- Desenvolvimento de ensaios à flexão dos sistemas mistos com laje maciça aqui estudados e comparação dos resultados com modelos numéricos e teóricos. Posterior calibração dos modelos numéricos com laje maciça;
- Desenvolvimento de uma equação que retrate o desempenho do conector do tipo Indentado e do conector do tipo Xadrez, para o caso de estudo desta dissertação;
- Desenvolvimento da Ferramenta de Cálculo para diferentes casos de carga e também para a análise da dispensa de escoramentos utilizados em obra;
- Análise de sistemas mistos, com perfis metálicos em aço enformado a frio, com laje nervurada e com conectores de formatos diferentes;
- Elaboração de ensaios experimentais em vigas mistas com aço leve e laje nervurada, onde o conector Indentado é posicionado em trechos descontínuos ao longo do comprimento da viga metálica. Avaliar o comprimento ótimo do conector e o espaçamento máximo para o correto desempenho do sistema misto;
- Avaliação do comportamento do conector Indentado e Xadrez em sistemas mistos em aço leve e com betão leve;
- Avaliação do desempenho de um conector do tipo Xadrez realizado em aço enformado a frio e comparação dos resultados obtidos com os resultados presentes nesta dissertação;
- Avaliação do desempenho de um conector de chapa nervurada do tipo Indentado, ou seja, analisar um conector resultante da junção dos dois conectores aqui estudados, mas realizado em aço enformado a frio.

Referências Bibliográficas

- Almeida, N., & Faria, P. (2008). TÓPICO 4 – Património Histórico, Soluções Construtivas para Pavimentos e Coberturas em Edifícios Antigos. In *4º CINPAR – Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação, Universidade de Aveiro* (p. 16). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10362/11329>
- Baptista, A. (2014). *Verificação de Segurança de Perfis de Aço Enformado a Frio com secção em C*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa.
- Červenka, J., & Procházková, Z. (2013). ATENA Program Documentation Part 4-2 Tutorial for Program ATENA 3D. *Červenka Consulting*.
- Červenka, J., & Procházková, Z. (2014). ATENA Program Documentation Part 2-2 User 's Manual for ATENA 3D. *Červenka Consulting*.
- Departamento Técnico da Fábrica de Tubos da Barca. (n.d.). Ficha Técnica: Perfil Galvanizado C. *Fábrica Da Barca, S.A.*
- Diógenes, H. J. F., El Debs, A. L. H. C., & Valente, I. B. (2015). Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion , interlocking and friction. *Journal of Constructional Steel Research, 110*. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.012>
- Diógenes, H. J. F. (2013). Análise Numérica e Experimental de Ligações por Aderência Aço - Concreto Aplicada em Estruturas Mistas. Dissertação de Doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (p. 196).
- EN 1993. (2006). *Norma Europeia - Eurocode 3 - Design of steel structures. CEN National Members - Comité Européu de Normalização*.
- Ferraz, H. (2005). O Aço na Construção Civil. *Revista Eletrônica de Ciências*.
- Gaspar, A. (2013). *Construção de Edifícios de Habitação em Light Steel Framing - Alternativa viável à construção tradicional*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Comunicação, Arquitectura, Artes e Tecnologias da Informação, Universidade Lusófuna do Porto.

- Gervásio, H. (2006). A sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas. In *CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Feira da Concreta, Porto*.
- Gouveia, D. (2015). *Soluções Construtivas com Elementos de Aço Enformados a Frio*. Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Funchal.
- Hanaor, A. (2000). Tests of Composite Beams with Cold-formed Sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 54(2), 245–264.
- Hsu, C.-T. T., Punurai, S., Punuri, W., & Majdi, Y. (2014). New Composite Beams having Cold-formed Steel Joists and Concrete Slab. *Engineering Structures*, 71, 187–200. <http://doi.org/http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614002247>
- Irwan, J. M., Hanizah, A. H., Azmi, I., & Koh, H. B. (2011). Large-scale Test of Symmetric Cold-formed Steel (CFS) - Concrete composite beams with BTTST enhancement. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(4), 720–726. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.008>
- J. Soares Correia. (n.d.). Ficha Técnica: Chapa Laminada a Frio Chapa Galvanizada, Chapa Electrogalvanizada e Chapa Lamidada a Quente. *J. Soares Correia. Armazens de Ferro, S.A.* Retrieved from <http://www.jsoarescorreia.pt/wp-content/uploads/1111/11/chapa.pdf>
- Laim, L., & Rodrigues, J. (2011a). Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas em Aço Enformado a Frio. In *VIII Congresso de Construção Metálica e Mista* (p. 10). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/261533441>
- Laim, L., & Rodrigues, J. (2011b). Avaliação Experimental do Comportamento Estrutural de Vigas em Aço Enformado a Frio. In *VIII Congresso de Construção Metálica e Mista* (p. 10). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/261536344>
- Lakkavalli, B. S., & Liu, Y. (2006). Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists. *Journal of Constructional Steel Research*, 62. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.02.003>
- M.Irwan, J., Hanizah, A. H., & Azmi, I. (2009). Test of Shear Transfer Enhancement in Symmetric Cold-formed Steel-concrete Composite Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 65. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.008>

- Majdi, Y., Hsu, C.-T. T., & Zarei, M. (2014). Finite Element Analysis of New Composite Floors having Cold-formed Steel and Concrete Slab. *Engineering Structures*, 77, 65–83. <http://doi.org/http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614004489>
- Martins, V. (2012). *Análise do Comportamento de Perfis Metálicos Enformados a Frio com Seção Transversal em C e Aberturas na Alma*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Univeridade do Minho.
- Moreira, H. (2012). *Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação*. Dissertação de Mestrado, Técnico de Lisboa.
- NP EN 1992-1-1. (2010). *Norma Portuguesa - Eurocódigo 2 - Projecto estruturas de betão*. Instituto Português da Qualidade.
- NP EN 1994-1-1. (2011). *Norma Portuguesa - Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão*. Instituto Português da Qualidade.
- O FELIZ. (2014). Ficha Técnica: Chapa Perfilada - Enformados a frio. *O FELIZ*. Retrieved from http://www.ofeliz.pt/sites/default/files/o_feliz_chapa_perfilada.pdf
- O FELIZ. (2016). Ficha Técnica: Laje Mista- Perfil H60. *O FELIZ*. Retrieved from http://www.ofeliz.pt/sites/default/files/o_feliz_laje_mista_-_h60.pdf
- PERFILNORTE. (2011). Ficha Técnica: PERFILNORTE. *PerfilNorte, Empresa de Perfilação, SA*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pinheiro, L., Catoia, B., Catoia, T., & Moreira, M. (2010). *TABELAS DE VIGAS: Deslocamentos e Momentos de Engastamento*. Universidade de São Paulo.
- Reis, L. (2012). *Lajes Mistas com Forma de Aço Incorporada: Aplicações, dimensionamento e metodologias de análise numérica*. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.
- Rodrigues, J. P. (n.d.). Ficha Técnica: Feero, Aço e Metais. *JOSÉ PEIXOTO RODRIGUES & Ca., Lda*.
- Ruiz, A. (2009). Structural Element for the Construction of Buildings_US 7,571,579 B2. United States.

- Simões, R., & Valente, I. (2009). Cálculo de uma Viga Mista. *CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica E Mista*.
- Simões, R., & Valente, I. (2014). *Projeto de Edifícios II – Lajes mistas*. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Thomann, M., & Lebet, J. (2007). The modelling of an embossed steel-to-cement paste confined interface loaded in shear. *Journal of Constructional Steel Research*, 63. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.038>
- Valente, I. (2008). *Vigas Mistas em Aço e Bestão -Estruturas pré-esforçadas e mistas*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.
- Valente, I. (2016). *Apontamentos Teóricos e Práticos de Estruturas Metálicas: 2 Aço em elementos estruturais*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil.
- Veríssimo, O. S. (2007). *Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento*. Tese de Doutoramento - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Vieira, W. B. (2009). *Avaliação Comparativa da Contribuição do Efeito de Pino do Concreto em Conectores de Cisalhamento em Chapa Perfurada*. Relatório Final como parte das exigências do FUNARBIC - Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa.

Sites Consultados

Metálica (2016). Acesso em Fevereiro de 2016. URL <http://wwwo.metallica.com.br>

António de Oliveira Borges (2016). Acesso em Março de 2016. URL <http://www.aob.pt/index.html>

José Peixoto Rodrigues (2016). Acesso em Março de 2016. URL <http://www.jpr.pt/site/home.asp>

ANEXOS

Anexo I

(Base de Dados da Ferramenta de Cálculo)

AI.1 Betão

Tabela AI.1 – Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para o betão.

	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,cube}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	ϵ_{c1} (‰)	ϵ_{cu} (‰)
C12/15	12	15	20	1,6	27	1,8	3,5
C16/20	16	20	24	1,9	29	1,9	3,5
C20/25	20	25	28	2,2	30	2,1	3,5
C25/30	25	30	33	2,6	31,5	2,2	3,5
C30/37	30	37	38	2,9	33	2,3	3,5
C35/45	35	45	43	3,2	34	2,4	3,5
C40/50	40	50	48	3,5	35	2,5	3,5
C45/55	45	55	53	3,9	36	2,55	3,5
C50/60	50	60	58	4,1	37	2,6	3,5
C55/67	55	67	63	4,2	38	2,65	3,4
C60/75	60	75	68	4,4	39	2,7	3,3
C70/85	70	85	78	4,6	41	2,8	3,2
C80/95	80	95	88	4,8	42	2,9	3,1
C90/105	90	105	98	5,0	44	2,95	3,0

AI.2 Aço enformado a frio

Tabela AI.2 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para o aço enformado a frio.

	f_y (MPa)	f_u (MPa)
S235	235	360
S275	275	430
S355	355	510
S220GD+Z	220	300
S250GD+Z	250	330
S280GD+Z	280	360
S320GD+Z	320	390
S350GD+Z	350	420
S220GD+ZA	220	300
S250GD+ZA	250	330
S280GD+ZA	280	360
S320GD+ZA	320	390
S350GD+ZA	350	420
S220GD+AZ	220	300
S250GD+AZ	250	330
S280GD+AZ	280	360
S320GD+AZ	320	390
S350GD+AZ	350	420
S275N	275	370
S355N	355	470
S420N	420	520
S460N	460	550
S275NL	275	370
S355NL	355	470
S420NL	420	520
S460NL	460	550
S275M	275	360
S355M	355	450
S420M	420	500
S460M	460	530
S275ML	275	360
S355ML	355	450
S420ML	420	500
S460ML	460	530

Tabela AI.2 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para o aço enformado a frio (continuação).

	f_y (MPa)	f_u (MPa)
S260NC	260	370
S315NC	315	430
S355NC	355	470
S420NC	420	530
S315MC	315	390
S355MC	355	430
S420MC	420	480
S460MC	460	520
S500MC	500	550
S550MC	550	600
S600MC	600	650
S650MC	650	700
S700MC	700	750
CR220	220	300
CR250	250	330
CR320	320	400
DX51D+Z	140	270
DX52D+Z	140	270
DX53D+Z	140	270
H240LA	240	340
H280LA	280	370
H320LA	320	400
H360LA	360	430
H400LA	400	460
H240LAD	240	340
H280LAD	280	370
H320LAD	320	400
H360LAD	360	430
H400LAD	400	460

AI.3 Armadura

Tabela AI.3 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para o diâmetro da armadura.

Designação	Diâmetro (mm)
φ3	3
φ3,4	3,4
φ3,8	3,8
φ4	4
φ4,5	4,5
φ5	5
φ5,5	5,5
φ6	6
φ6,5	6,5
φ7	7
φ7,5	7,5
φ8	8
φ8,5	8,5
φ9	9
φ10	10
φ12	12
φ16	16
φ20	20
φ25	25

Tabela AI.4 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para o espaçamento da armadura.

Espaçamento (mm)

50
60
75
80
125
100
150
175
200
225
250
275
300

AI.4 Coeficientes de regressão (conector *Indentado*)

Tabela AI.5 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para os coeficientes de regressão.

Autores	B1	B2	B3	B4
Veríssimo G. S.	1,96	2,72	0,07	3,57
Vieira W. B.	3,56	0,536	1,62	28,76

AI.5 Variáveis para a tensão tangencial máxima (conector *Xadrez*)

Tabela AI.6 - Base de dados da Ferramenta de Cálculo, para as variáveis do $\tau_{m\acute{a}x}$.

Autores	A'	μ	σ_0 (Mpa)	m		κ	
				R1	R2	R1	R2
Thomann M., Lebet J. P.	0,13	0,72	0,7	0,127	0,051	0,66	0,73

AI.6 Perfis com secção em “C” enformados a frio

Tabela AI.7 – Perfis “C” enformados a frio.

Referência	Propriedades Geométricas																	Empresa
	Peso (kg/m)	h (mm)	b (mm)	a (mm)	t (mm)	A (mm ²)	yg (mm)	zg (mm)	Iyg (mm ⁴)	Izg (mm ⁴)	Wy (mm ³)	Wz (mm ³)	iy (mm)	iz (mm)	Iw (mm ⁶)	It (mm ⁴)	yc (mm)	
C140x60x1,5	3,5	140	60	20	1,5	441	19,3	69,25	1380840	233601	19940	5959	56	23	1013638507	331	29,3	
C140x60x1,8	4,2	140	60	20	1,8	527	19,2	69,1	1642329	276048	23767	7071	56	23	1189999614	569	29,1	
C140x60x2,0	4,7	140	60	20	2	584	19,1	69	1813987	303584	26290	7798	56	23	1302974988	779	28,9	
C170x60x1,5	3,9	170	60	20	1,5	486	17,5	84,25	2167141	248821	25723	6071	67	23	1507653427	365	27,7	
C170 x60x1,8	4,7	170	60	20	1,8	581	17,4	84,1	2579978	294047	30677	7204	67	22	1772293964	628	27,5	
C170 x60x2,0	5,2	170	60	20	2	644	17,3	84	2851447	323388	33946	7944	67	22	1942256894	859	27,4	
C170 x60x2,5	6,5	170	60	20	2,5	800	17,1	83,75	3517077	393960	41995	9744	66	22	2345161114	1667	27,1	
C200 x65x1,8	5,2	200	65	20	1,8	653	17,7	99,1	3955874	373924	39918	8212	78	24	3011421479	705	28,5	
C200 x65x2,0	5,8	200	65	20	2	724	17,6	99	4374733	411508	44189	9059	78	24	3304402438	965	28,4	
C200 x65x2,5	7,3	200	65	20	2,5	900	17,4	98,75	5404082	502151	54725	11125	77	24	4002637887	1875	28,1	
C240 x65x1,8	5,8	240	65	20	1,8	725	15,9	119,1	6081975	394177	51066	8335	92	23	4477152721	783	26,8	
C240 x65x2,0	6,4	240	65	20	2	804	15,8	119	6729080	433792	56547	9196	91	23	4915608680	1072	26,7	
C240 x65x2,5	8	240	65	20	2,5	1000	15,6	118,75	8322103	529329	70081	11292	91	23	5963032071	2083	26,4	
C250 x70x1,8	6,1	250	70	20	1,8	761	17,2	124,1	6979100	476440	56238	9335	96	25	5819610899	822	28,7	
C250 x70x2,0	6,8	250	70	20	2,0	844	17,1	124,0	7723193	524624	62284	10303	96	25	6393869625	1125	28,6	
C250 x70x2,5	8,4	250	70	20	2,5	1050	16,9	123,8	9556348	641094	77223	12664	95	25	7769573353	2188	28,3	

O FELIZ

Tabela AI.7 – Perfis “C” enformados a frio (continuação).

Referência	Propriedades Geométricas																Empresa	
	Peso (kg/m)	h (mm)	b (mm)	a (mm)	t (mm)	A (mm ²)	yg (mm)	zg (mm)	Iy (mm ⁴)	Iz (mm ⁴)	Wy (mm ³)	Wz (mm ³)	iy (mm)	iz (mm)	Iw (mm ⁶)	It (mm ⁴)		yc (mm)
C270x75x1,8	6,5	270	75	20	1,8	815	18	134,1	8701439	574912	64888	10417	103	27	8108097013	880	30,3	O FELIZ
C270x75x2,0	7,2	270	75	20	2	904	17,9	134	9631693	633373	71878	11501	103	26	8914400830	1205	30,1	
C270x75x2,5	9	270	75	20	2,5	1125	17,7	133,75	11925723	774964	89164	14147	103	26	10851514686	2344	29,8	
C300x80x2,0	7,9	300	80	20	2	984	18,4	149	12818680	762554	86031	12792	114	28	13130887167	1312	31,3	
C300x80x2,5	9,8	300	80	20	2,5	1225	18,2	148,75	15883665	934061	106781	15749	114	28	16012098206	2552	31	
C300x80x3,0	11,8	300	80	20	3	1464	18	148,5	18893523	1098248	127229	18611	114	27	18741632744	4392	30,7	
C100x42x1,5	2,48	100	42	19	1,5	315	15	50	482600	84700	9652	3137,04	39	16		200		PERFIL NORTE
C100x42x2,0	3,26	100	42	19	2	416	15	50	627900	108500	12558	4018,52	39	16	—	600	—	
C100x42x2,5	4,03	100	42	19	2,5	514	15	50	765700	130300	15314	4825,93	39	16	—	1100	—	
C100x42x3,0	4,78	100	42	19	3	609	15	50	896100	150000	17922	5555,56	38	16	—	1800	—	
C120x52x1,5	2,95	120	52	19	1,5	375	17,7	60	848300	149000	14138,333	4344,02	48	20		300		
C120x52x2,0	3,89	120	52	19	2	496	17,7	60	1108300	192200	18471,667	5603,50	47	20	—	700	—	
C120x52x2,5	4,82	120	52	19	2,5	614	17,7	60	1357200	232200	22620	6769,68	47	19	—	1300	—	
C120x52x3,0	5,72	120	52	19	3	729	17,7	60	1595200	269300	26586,667	7851,31	47	19	—	2200	—	
C140x43x1,5	2,95	140	43	18	1,5	375	12,9	70	1078900	97800	15412,857	3249,17	54	16		300		
C140x43x2,0	3,89	140	43	18	2	496	12,9	70	1409700	125400	20138,571	4166,11	53	16	—	700	—	
C140x43x2,5	4,82	140	43	18	2,5	614	12,9	70	1726600	150600	24665,714	5003,32	53	16	—	1300	—	
C140x43x3,0	5,72	140	43	18	3	729	12,9	70	2029600	173600	28994,286	5767,44	53	15	—	2200	—	

Tabela AI.7 – Perfis “C” enformados a frio (continuação).

Referência	Propriedades Geométricas															Empresa
	Peso (kg/m)	h (mm)	b (mm)	a (mm)	t (mm)	A (mm ²)	yg (mm)	zg (mm)	Iyg (mm ⁴)	Izg (mm ⁴)	Wy (mm ³)	Wz (mm ³)	iy (mm)	iz (mm)	It (mm ⁴)	
C170x52x1,5	3,54	170	52	19	1,5	450	14,9	85	1922200	167000	22614,118	4501,35	65	19	300	PERFIL NORTE
C170x52x2,0	4,68	170	52	19	2	596	14,9	85	2520300	215500	29650,588	5808,63	65	19	800	
C170x52x2,5	5,8	170	52	19	2,5	739	14,9	85	3097500	260500	36441,176	7021,56	65	19	1500	
C170x52x3,0	6,9	170	52	19	3	879	14,9	85	3654000	302100	42988,235	8142,86	64	19	2600	
C200x52x1,5	3,89	200	52	19	1,5	495	13,6	100	2830900	175200	28309	4562,50	76	19	400	
C200x52x2,0	5,15	200	52	19	2	656	13,6	100	3717000	226000	37170	5885,42	75	19	900	
C200x52x2,5	6,39	200	52	19	2,5	814	13,6	100	4574800	273200	45748	7114,58	75	18	1700	
C200x52x3,0	7,61	200	52	19	3	969	13,6	100	5404700	316900	54047	8252,60	75	18	2900	
C220x64,5x1,5	4,42	220	64,5	19	1,5	563	17	110	4006800	301900	36425,455	6355,79	84	23	400	
C220x64,5x2,0	5,85	220	64,5	19	2	746	17	110	5271100	391500	47919,091	8242,11	84	23	1000	
C220x64,5x2,5	7,27	220	64,5	19	2,5	926	17	110	6500200	475800	59092,727	10016,84	84	23	1900	
C220x64,5x3,0	8,67	220	64,5	19	3	1104	17	110	7694400	554900	69949,091	11682,11	83	22	3300	
C240x54,5x1,5	4,42	240	54,5	19	1,5	563	13	120	4499400	206100	37495	4966,27	89	19	400	
C240x54,5x2,0	5,85	240	54,5	19	2	746	13	120	5917800	266100	49315	6412,05	89	19	1000	
C240x54,5x2,5	7,27	240	54,5	19	2,5	926	13	120	7296200	322100	60801,667	7761,45	89	19	1900	
C240x54,5x3,0	8,67	240	54,5	19	3	1104	13	120	8634800	374000	71956,667	9012,05	88	18	3300	
C270x61x1,5	5,16	270	61	29	1,5	627	14	135	6339700	278900	46960,741	5934,04	101	21	500	
C270x61x2,0	6,84	270	61	29	2	832	14	135	8349800	361100	61850,37	7682,98	100	21	1100	
C270x61x2,5	8,51	270	61	29	2,5	1034	14	135	10308900	438300	76362,222	9325,53	100	21	2200	
C270x61x3,0	10,15	270	61	29	3	1233	14	135	12217600	510500	90500,741	10861,70	100	20	3700	

Tabela AI.7 – Perfis “C” enformados a frio (continuação).

Referência	Propriedades Geométricas																	Material	Empresa	
	Peso (kg/m)	h (mm)	b (mm)	a (mm)	t (mm)	R _{i,int} (mm)	A (mm ²)	y _g (mm)	z _g (mm)	I _y (mm ⁴)	I _z (mm ⁴)	W _y (mm ³)	W _z (mm ³)	i _y (mm)	i _z (mm)	I _t (mm ⁴)	W _t (mm ³)			
C300x77x1,5	5,66	300	77	19	1,5		720	18	150	9254300	505600	61695,333	8569,49	113	26	500	—	—	PERFIL NORTE	
C300x77x2,0	7,5	300	77	19	2		956	18	150	12208700	658100	81391,333	11154,24	113	26	1300	—	—		
C300x77x2,5	9,33	300	77	19	2,5		1189	18	150	15098600	802900	100657,33	13608,47	113	26	2500	—	—		
C300x77x3,0	11,14	300	77	19	3		1419	18	150	17924500	940100	119496,67	15933,90	112	26	4300	—	—		
C120x55x1,5	3,06	120	55	20	1,5	1,5	390			894000	176000		4940					199,9	S220GD+Z	F.T.B
C120x55x2,0	4,03	120	55	20	2	2	514			1163000	227000		6340					355,4		
C120x55x2,5	4,98	120	55	20	2,5	2,5	634			1418000	273000		7620					555,3		
C140x55x1,5	3,3	140	55	20	1,5	1,5	420			1280000	186000		5010					214,9		
C140x55x2,0	4,35	140	55	20	2	2	554			1668000	239000		6440					382,1		
C140x55x2,5	5,37	140	55	20	2,5	2,5	684			2037000	287000		7740					597		
C170x55x1,5	3,65	170	55	20	1,5	1,5	465			2018000	198000		5110					232,9		
C170x55x2,0	4,82	170	55	20	2	2	614			2636000	254000		6550					414,1		
C170x55x2,5	5,96	170	55	20	2,5	2,5	759			3226000	305000		7880					647		
C200x55x1,5	4,01	200	55	20	1,5	1,5	510			2966000	207000		5170					259,9		
C200x55x2,0	5,29	200	55	20	2	2	674			3880000	266000		6640					462,1		
C200x55x2,5	6,55	200	55	20	2,5	2,5	834			4756000	320000		7980					722		
C220x55x1,5	4,24	220	55	20	1,5	1,5	540			3724000	213000		5200					274,9		
C220x55x2,0	5,6	220	55	20	2	2	714			4876000	273000		6680					488,8		
C220x55x2,5	6,94	220	55	20	2,5	2,5	884			5983000	328000		8030					488,8		

Tabela AI.8 – Chapas perfiladas enformadas a frio (continuação).

Referência	Propriedades do aço			Parâmetros de corte longitudinal		Flexão Positiva		Flexão Negativa		Resistência ao Esmagamento da Alma (kN/m)	Resistência ao Corte (kN/m)	Material	Empresa
	fyb (N/mm ²)	fu (N/mm ²)	δ (%)	m (N/mm ²)	k (N/mm ²)	Momento Resistente (kN.m/m)	Momento de Inércia (cm ⁴ /m)	Momento Resistente (kN.m/m)	Momento de Inércia (cm ⁴ /m)				
1PC60x820x0,7	≥ 320	≥ 390	≥ 17	98,32	0,08	4,83	50,36	3,21	45,08	19,89	43,95	S320GD+Z	O FELIZ
1PC60x820x0,8	≥ 320	≥ 390	≥ 17	98,32	0,08	5,66	59,96	4,2	55	25,76	58,28		
1PC60x820x1,0	≥ 320	≥ 390	≥ 17	98,32	0,08	7,31	79,98	6,04	74,2	39,43	92,98		
1PC60x820x1,2	≥ 320	≥ 390	≥ 17	98,32	0,08	8,97	95,93	7,86	94,54	55,59	120,04		
2PC60x820x0,7	≥ 320	≥ 360		98,32	0,08	4,28	51,17	2,98	46,78	18,6	41,11		
2PC60x820x0,8	≥ 320	≥ 360		98,32	0,08	4,99	60,91	3,9	56,04	24,09	54,51		
2PC60x820x1,0	≥ 320	≥ 360		98,32	0,08	6,44	81,26	5,43	75,6	36,88	86,93		
2PC60x820x1,2	≥ 320	≥ 360		98,32	0,08	7,9	95,93	7,06	96,31	52	105,04		
PC65x880x0,7											S320GD+Z	PERFIL NORTE	
PC65x880x0,75													
PC65x880x0,8													
PC65x880x0,9													
PC65x880x1,0													
PC65x880x1,2													
PC65x880x1,25													

Anexo II

(Dados de Saída da Ferramenta de Cálculo)

Características plásticas (ELU)		
Forças totais plásticas		
Ncf,tot	446,25 kN	força compressão no betão, sem betão no local do conector
Ncf	0 kN	força compressão no betão no local do conector
Ncf,1	446,25 kN	força compressão no betão, acima do conector (só interessa no Caso A)
Nperfil,tot	327,04 kN	força tração no perfil
Nperfil,bancos sup	67,20 kN	força compressão no perfil, nos bancos
Nperfil,abas sup	40,32 kN	força compressão no perfil, nas abas
Nchapa,tot	154,00 kN	força tração na chapa
Nchapa,1	154,00 kN	força tração na chapa, na altura total do perfil
Nchapa,1A	132,00 kN	força tração na chapa, na altura abaixo da aba do perfil
Nchapa,1B	19,80 kN	força tração/compressão na chapa, na altura da aba do perfil
Nchapa,1C	2,20 kN	força compressão na chapa, na altura da espessura do banco
Nchapa,2	0,00 kN	força compressão na chapa, na altura da chapa nervurada
Nchapa,3	0,00 kN	força compressão na chapa, dentro da esp. maciça da laje

Momento plástico resistente		
Mpl,Rd	72,73 kN.m	<input type="button" value="Calcular"/>

Posição do eixo neutro		
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil

Figura AII.1 – Características plásticas

Características plásticas (ELU)			
Hipóteses de Cálculo			
Caso A: $h_{chapa} > h_a + h_p$	0		
Caso A.1: EN na laje de betão, acima do conector			
Forças plásticas			
Forças Compressão	481,04 kN	0	
Forças Tração	481,04 kN		
Profundidade do E.N.			
z	64,68 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	75,84 kN.m		
Caso A.2: EN na laje de betão atravessando o conector			
Forças plásticas			
Forças Compressão	528,53 kN	0	
Forças Tração	528,53 kN		
Profundidade do E.N.			
z	76,83 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	78,62 kN.m		
Caso A.3: EN na chapa perfurada da laje			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	135,81 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	73,56 kN.m		
Caso A.4: EN no banzo superior do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		
Caso A.5: EN nas abas superiores do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	106,43 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	69,10 kN.m		
Caso A.6: EN no perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	89,49 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	64,23 kN.m		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil	
Momento plástico resistente			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		
Caso B: $h_{chapa} > h_a$ e $h_{chapa} \leq h_a + h_p$	0		
Caso B.1: EN na laje de betão			
Forças plásticas			
Forças Compressão	481,04 kN	0	
Forças Tração	481,04 kN		
Profundidade do E.N.			
z	64,68 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	75,84 kN.m		
Caso B.2: EN na chapa perfurada da laje			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	135,81 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	73,56 kN.m		
Caso B.3: EN no banzo superior do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		
Caso B.4: EN nas abas superiores do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	106,43 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	69,10 kN.m		
Caso B.5: EN no perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,64 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	89,49 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	64,23 kN.m		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil	
Momento plástico resistente			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		
Caso C: $h_{chapa} \leq h_a$	1		
Caso C.1: EN na laje de betão			
Forças plásticas			
Forças Compressão	481,04 kN	0	
Forças Tração	481,04 kN		
Profundidade do E.N.			
z	64,68 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	75,84 kN.m		
Caso C.2: EN no banzo superior do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		
Caso C.3: EN nas abas superiores do perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	106,43 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	69,10 kN.m		
Caso C.4: EN no perfil			
Forças plásticas			
Forças Compressão	463,65 kN	0	
Forças Tração	463,65 kN		
Profundidade do E.N.			
z	89,49 mm		
Momento plástico			
Mpl,Rd	64,23 kN.m		
Profundidade do E.N.			
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil	
Momento plástico resistente			
Mpl,Rd	72,73 kN.m		

Figura AII.1 – Características plásticas (continuação).

Características elásticas		
Posição do eixo neutro		Verificações das tensões
EN na laje da chapa perfilada		σ_a 310,72 MPa
		σ_c 24,20 MPa
Hipoteses de Cálculo		
yg,total	171,14 mm	
Caso A: EN na laje de betão		
Profundidade do E.N.		
a	26,25 mm	
b	2268,00 mm	
c	-386920,00 mm	
z	85,66 mm	
Momento de inércia		
Ic	2750300,39 mm ⁴	
Ichapa	4436666,67 mm ⁴	
dc	42,83 mm	
da	104,34 mm	
dchapa	64,34 mm	
Im	36333546,3 mm ⁴	
Tensões		
zm	174,34 mm	
σ_a	313,46 MPa	
σ_c	23,10 MPa	
Caso B: EN na laje da chapa perfilada ou no perfil		
Profundidade do E.N.		
z	88,86 mm	
Momento de inércia		
Ic	945000,00 mm ⁴	
Ichapa	4436666,67 mm ⁴	
dc	58,86 mm	
da	101,14 mm	
dchapa	61,14 mm	
Im	35982545,8 mm ⁴	
Tensões		
zm	171,14 mm	
σ_a	310,72 MPa	
σ_c	24,20 MPa	

Figura AII.2 – Características elásticas

Deformação (ELS)		
Posição do eixo neutro		Flecha máxima
EN na laje da chapa perfilada		f 4,83 mm
Cálculos Auxiliares		
yg,total	171,14 mm	
Profundidade do E.N.		
z	88,86 mm	
Momento de inércia		
Im	35982546 mm ⁴	
Rigidez		
EI	7,56E+12 Nmm ²	

Figura AII.3 – Deformação

Esforço Rasante (conexão não dúctil)	
Posição do eixo neutro	
EN na laje da chapa perfilada	
Esforço rasante	
r	386,43 kN/m
Cálculos Auxiliares	
yg,total	171,14 mm
Profundidade do E.N.	
z	88,86 mm
Sc	185395,35 mm ³
Momento de inércia	
Im	35982545,8 mm ⁴
Esforço transversal atuante	
V	75 kN

Figura AII.4 – Esforço Rasante

Resistência do Conector Indentado		
Coeficiente Regressão Automático	Força Compressão na Face Frontal do Conector = 0	Resistência ao corte
Coeficiente Regressão Manual	Força Compressão na Face Frontal do Conector = 1	
		q 683,19 kN
Cálculos Auxiliares		
Coeficientes de regressão		
B1	1,96	Coeficiente B automático!
B2	2,720	
B3	0,07	
B4	3,57	
Resistência ao corte		
q (veríssimo)	683,19 kN	
q (vieira)	194,91 kN	
β	0	
Força mínima plástica		
VI	446,25 kN	

Figura AII.5 – Resistência ao corte do conector de chapa lisa do tipo Indentado.

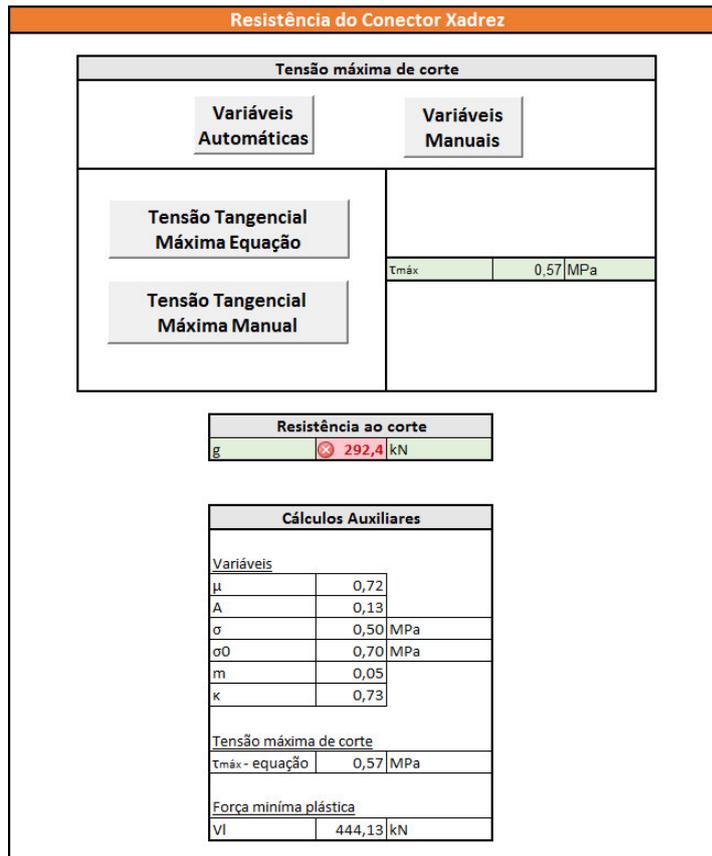


Figura AII.6 – Resistência ao corte do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez.

Anexo III

(Validação Manual da Ferramenta de Cálculo)

AIII.1 Características plásticas

AIII.1.1 Forças aplicadas

A Equação (AIII.1) traduz o cálculo manual efetuada para a determinação da força de compressão total aplicada na laje de betão.

$$\begin{aligned}
 N_{cf,tot} &= h_c \times b_{eff} \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} - N_{cf}' = \\
 &= h_c \times b_{eff} \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} - e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + h_c) \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = \\
 &= 60 \times 350 \times \frac{0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} - 5 \times (220 - 260 + 60) \times \frac{0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} = \\
 &= 446,25 - 2,125 = \\
 &= 444,125 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{AIII.1}$$

Se alterarmos a altura da chapa do conector para por exemplo 190 mm, o valor da força $N_{cf,tot}$ já vai ser de 446,25 kN, porque N_{cf}' vai ser igual a zero.

O cálculo manual da força de compressão do betão acima do conector, $N_{cf,1}$, é descrito pela Equação (AIII.2).

$$N_{cf,1} = b_{eff} \times (h_{total} - h_{chapa}) \times \frac{0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = 350 \times (260 - 220) \times \frac{0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} = 297,5 \text{ kN} \tag{AIII.2}$$

Se a altura da chapa do conector não ultrapassar para a laje de betão, por exemplo se for de 190 mm, a força $N_{cf,1}$ vai ter o mesmo valor que a força $N_{cf,tot}$.

Na Figura AIII.1 encontram-se o resultado das forças $N_{cf,tot}$, N_{cf}' e $N_{cf,1}$ obtidas na Ferramenta de Cálculo, e, como se pode ver os valores são os mesmos que os calculados manualmente.

$N_{cf,tot}$	444,125 kN	$N_{cf,tot}$	446,25 kN
N_{cf}'	2,125 kN	N_{cf}'	0 kN
$N_{cf,1}$	297,5 kN	$N_{cf,1}$	446,25 kN

(a) (b)

Figura AIII.1 – Resultados das forças aplicadas na laje de betão, obtidos na Ferramenta de Cálculo: (a) $h_{chapa} = 220$ mm; (b) $h_{chapa} = 190$ mm.

A força total aplicada nos perfis “C”, $N_{perfil,tot}$, é descrita pela Equação de cálculo manual (AIII.3).

$$N_{\text{perfil,tot}} = \frac{2 \cdot A_a \times f_y}{\gamma_a} = \frac{2 \times 584 \times 280}{1} \times 10^{-3} = 327,04 \text{ kN} \quad (\text{AIII.3})$$

A força localizada apenas nos banzos superiores dos dois perfis “C”, $N_{\text{perfil,banzos,sup}}$, é dada pela Equação de cálculo manual (AIII.4).

$$N_{\text{perfil,banzos,sup}} = \frac{2 \cdot b \times t \times f_y}{\gamma_a} = \frac{2 \times 60 \times 2 \times 280}{1} \times 10^{-3} = 67,20 \text{ kN} \quad (\text{AIII.4})$$

O cálculo manual da força de tração nas abas superiores dos perfis “C”, $N_{\text{perfil,abas,sup}}$, é descrito pela Equação (AIII.5).

$$N_{\text{perfil,abas,sup}} = \frac{4 \cdot t \times (a - t) \times f_y}{\gamma_a} = \frac{4 \times 2 \times (20 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} = 40,32 \text{ kN} \quad (\text{AIII.5})$$

Na Figura AIII.2 encontram-se o resultado das forças $N_{\text{perfil,tot}}$, $N_{\text{perfil,banzos,sup}}$ e $N_{\text{perfil,abas,sup}}$ obtidas na Ferramenta de Cálculo, e, como se pode ver os valores são os mesmos que os calculados manualmente.

Nperfil,tot	327,04 kN
Nperfil,banzos sup	67,20 kN
Nperfil,abas sup	40,32 kN

Figura AIII.2 - Resultados das forças aplicadas nos perfis “C”, obtidos na Ferramenta de Cálculo, com $h_{\text{chapa}} = 220 \text{ mm}$.

A força total na chapa do conector, $N_{\text{chapa,tot}}$, é descrita através da Equação de cálculo manual (AIII.6).

$$N_{\text{chapa,tot}} = \frac{e_{\text{chapa}} \times h_{\text{chapa}} \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} = \frac{5 \times 220 \times 220}{1} \times 10^{-3} = 242,0 \text{ kN} \quad (\text{AIII.6})$$

A força na chapa do conector na altura total do perfil de secção “C”, $N_{\text{chapa,1}}$, é dada pela Equação de cálculo manual (AIII.7).

$$N_{\text{chapa,1}} = \frac{e_{\text{chapa}} \times h_a \times f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} = \frac{5 \times 140 \times 220}{1} \times 10^{-3} = 154,0 \text{ kN} \quad (\text{AIII.7})$$

Se a altura da chapa do conector for inferior ou igual a altura dos perfis de secção “C”, por exemplo 100 mm, então o cálculo manual da força $N_{chapa,1}$, já é efetuada com base na Equação (AIII.8).

$$N_{chapa,1} = \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times 100 \times 220}{1} \times 10^{-3} = 110,0kN \quad (\text{AIII.8})$$

A força da chapa do conector na altura imediatamente abaixo das abas superiores do perfil de secção “C”, $N_{chapa,1A}$ é dada pela Equação de cálculo efetuada manualmente (AIII.9).

$$N_{chapa,1A} = \frac{e_{chapa} \times (h_a - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (140 - 20) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 132,0kN \quad (\text{AIII.9})$$

Se a altura da chapa do conector se situar abaixo das abas superiores dos perfis de secção “C”, como por exemplo a altura da chapa ser igual a 100 mm, então a Equação da força $N_{chapa,1A}$ que traduz o cálculo realizado manualmente é (AIII.10).

$$N_{chapa,1A} = \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times 100 \times 220}{1} \times 10^{-3} = 110,0kN \quad (\text{AIII.10})$$

A força da chapa do conector na altura das abas do perfil, $N_{chapa,1B}$, é calculada manualmente de acordo com a Equação (AIII.11).

$$N_{chapa,1B} = \frac{e_{chapa} \times (a - t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (20 - 2) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 19,80kN \quad (\text{AIII.11})$$

Se a altura máxima da chapa do conector se situar entre a espessura dos banzos superiores e as abas superiores dos perfis “C”, por exemplo altura da chapa igual a 130 mm, então o cálculo realizado manualmente vai ser traduzido pela Equação (AIII.12).

$$N_{chapa,1B} = \frac{e_{chapa} \cdot (h_{chapa} - h_a + a) \cdot f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (130 - 140 + 20) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 110,0kN \quad (\text{AIII.12})$$

A força aplicada na chapa do conector na altura da espessura dos banzos superiores do perfil “C”, $N_{chapa,1C}$, é calculada manualmente pela Equação (AIII.13).

$$N_{chapa,1C} = \frac{e_{chapa} \times t \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times 2 \times 220}{1} \times 10^{-3} = 2,20kN \quad (AIII.13)$$

No caso da altura máxima da chapa do conector se situar na espessura dos banzos superiores dos perfis de secção “C”, por exemplo altura de 139 mm, então o cálculo manual da força $N_{chapa,1C}$ é dado pela Equação (AIII.14).

$$N_{chapa,1C} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a + t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (139 - 140 + 2) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 1,10kN \quad (AIII.14)$$

O cálculo realizado manualmente para determinar a força na chapa do conector dentro da espessura da laje maciça, $N_{chapa,3}$, é descrito pela Equação (AIII.15). Se a chapa do conector não intercetar a laje maciça, então a força $N_{chapa,3}$ é igual a zero.

$$N_{chapa,3} = \frac{e_{chapa} \cdot (h_{chapa} - h_{total} + h_c) \cdot f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (220 - 260 + 60) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 22kN \quad (AIII.15)$$

A força aplicada na chapa do conector na altura da chapa perfilada, $N_{chapa,2}$, é calculada manualmente pela Equação (AIII.16).

$$N_{chapa,2} = \frac{e_{chapa} \cdot (h_{chapa} - h_a) \cdot f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} - N_{chapa,3} = \frac{5 \times (220 - 140) \times 220}{1} \times 10^{-3} - 22 = 66kN \quad (AIII.16)$$

Se a chapa do conector não intercetar a laje de betão, por exemplo se a chapa possuir uma altura de 190 mm, então o cálculo efetuado manualmente para a força $N_{chapa,2}$ é descrito pela Equação (AIII.17).

$$N_{chapa,2} = \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} = \frac{5 \times (190 - 140) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 55,0kN \quad (AIII.17)$$

Na Figura AIII.3 encontram-se o resultado das forças aplicadas ao longo da chapa do conector, obtidas na Ferramenta de Cálculo, e, como se pode ver os valores são os mesmos que os calculados manualmente.

Nchapa,tot	242,00	kN	Nchapa,tot	110,00	kN	Nchapa,tot	143,00	kN
Nchapa,1	154,00	kN	Nchapa,1	110,00	kN	Nchapa,1	143,00	kN
Nchapa,1A	132,00	kN	Nchapa,1A	110,00	kN	Nchapa,1A	132,00	kN
Nchapa,1B	19,80	kN	Nchapa,1B	0,00	kN	Nchapa,1B	11,00	kN
Nchapa,1C	2,20	kN	Nchapa,1C	0,00	kN	Nchapa,1C	0,00	kN
Nchapa,2	66,00	kN	Nchapa,2	0,00	kN	Nchapa,2	0,00	kN
Nchapa,3	22,00	kN	Nchapa,3	0,00	kN	Nchapa,3	0,00	kN

(a)

(b)

(c)

Nchapa,tot	152,90	kN
Nchapa,1	152,90	kN
Nchapa,1A	132,00	kN
Nchapa,1B	19,80	kN
Nchapa,1C	1,10	kN
Nchapa,2	0,00	kN
Nchapa,3	0,00	kN

(d)

Nchapa,tot	209,00	kN
Nchapa,1	154,00	kN
Nchapa,1A	132,00	kN
Nchapa,1B	19,80	kN
Nchapa,1C	2,20	kN
Nchapa,2	55,00	kN
Nchapa,3	0,00	kN

(e)

Figura AIII.3 - Resultados das forças aplicadas nos perfis “C”, obtidos na Ferramenta de Cálculo:

(a) $h_{chapa} = 220$ mm; (b) $h_{chapa} = 100$ mm; (c) $h_{chapa} = 130$ mm; (d) $h_{chapa} = 139$ mm; (e) $h_{chapa} = 190$ mm.

AIII.1.2 Profundidade do eixo neutro e momento plástico resistente

Os dados que foram inicialmente escolhidos para o cálculo das forças, vão ser utilizados para os cálculos do Caso A, pois este Caso só é válido se o conector intercepar a laje maciça de betão.

Para a primeira hipótese de cálculo (A.1), em que o e.n. se situa na laje de betão acima da chapa do conector, o cálculo efetuado manualmente para a determinação da profundidade do e.n. é traduzido pela Equação (AIII.18).

$$\begin{aligned}
 \text{Forças de compressão} &= \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{b_{eff} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} &= N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{350 \times z \times 0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} &= 327,04 + 242,0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow z &= 76,51 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{AIII.18}$$

Para a mesma hipótese de cálculo, o cálculo realizado manualmente para a determinação do momento plástico resistente é traduzido pela Equação (AIII.19).

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot z \right) + N_{chapa,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_{chapa} - \frac{1}{2} \cdot z \right) = \\
&= 327,04 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{76,51}{2} \right) \times 10^{-3} + 242,0 \times \left(260 - \frac{220}{2} - \frac{76,51}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 76,67 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.19}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.4 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso A.1, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático do Excel.

Caso A.1: EN na laje de betão, acima do conector		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	569,04 kN	0
Forças Tração	569,04 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	76,51 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	76,67 kN.m	

Figura AIII.4 – Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.1.

O cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n. e do omento plástico resistente para o Caso A.2, onde o e.n. se localiza na laje de betão mas atravessando o conector, é descrito pela Equação (AIII.20) e (AIII.21), respetivamente.

$$\begin{aligned}
&\text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \\
\Leftrightarrow &\frac{b_{eff} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{total} + h_{chapa}) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} - \\
&- \frac{e_{chapa} \times (z - h_{total} + h_{chapa}) \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = N_{perfil,tot} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow &\frac{350 \times z \times 0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (z - 260 + 220) \times 220}{1} \times 10^{-3} - \\
&- \frac{5 \times (z - 260 + 220) \times 0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} = 327,04 + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow &z = 68,49 \text{ mm}
\end{aligned}
\tag{AIII.20}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot z \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{1}{2} \cdot z \right) - \\
&- \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\left(h_{total} - \frac{z}{2} \right) - (h_{total} - z) - \left(\frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) \right) = \\
&= 327,04 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{68,49}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (260 - 68,49) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 68,49}{2} + \frac{68,49}{2} \right) \times 10^{-3} - \\
&- \frac{5 \times (220 - 260 + 68,49) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \\
&\times \left(\left(260 - \frac{68,49}{2} \right) - (260 - 68,49) - \left(\frac{220 - 260 + 68,49}{2} \right) \right) \times 10^{-3} = \\
&= 77,70 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.21}$$

Na Figura AIII.5 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso A.2, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso A.2: EN na laje de betão atravessando o conector		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	537,70 kN	0
Forças Tração	537,70 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	68,49 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	77,70 kN.m	

Figura AIII.5 – Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.2.

Para o Caso A.3, quando o e.n. se situa na chapa perfilada da laje, o cálculo de verificação realizado manualmente para a determinação de z e $M_{pl,Rd}$, encontra-se descrito nas Equações (AIII.22) e (AIII.23), respetivamente.

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
\Rightarrow N_{cf,tot} + \frac{e_{chapa} \cdot (z - h_{total} + h_{chapa}) \cdot f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} &= N_{perfil,tot} + \frac{e_{chapa} \cdot (h_{total} - z) \cdot f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \quad (\text{AIII.22}) \\
\Rightarrow 444,125 + \frac{5 \times (z - 260 + 220) \times 220}{1} \times 10^{-3} &= 327,04 + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
\Rightarrow z = 96,78 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot h_c \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(h_{total} - \frac{h_c}{2} - \frac{h_{total} - z}{2} \right) - \\
&- \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(z - \frac{h_c}{2} - \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) = \quad (\text{AIII.23}) \\
&= 327,04 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{60}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (260 - 96,78) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 96,78}{2} \right) \times 10^{-3} - \\
&- \frac{5 \times (220 - 260 + 96,78) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(96,78 - \frac{60}{2} - \frac{220 - 260 + 96,78}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 76,57 \text{ kN.m}
\end{aligned}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.6 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso A.3, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático da Ferramenta de Cálculo.

Caso A.3: EN na chapa perfilada da laje		
		1
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	506,58 kN	0
Forças Tração	506,58 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	96,78 mm	
<u>Momento plástico</u>		
M _{pl,Rd}	76,57 kN.m	

Figura AIII.6 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.3.

O cálculo efetuado manualmente do Caso A.4, onde o e.n. se localiza nos banzos dos perfis “C”, para determinar a profundidade do e.n. e o momento plástico resistente, encontra-se descrito nas Equações (AIII.24) e (AIII.25).

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje}) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
& = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \quad (AIII.24) \\
& \Leftrightarrow 444,125 + 66 + 22 + \frac{5 \times (z - 120) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\
& = 327,04 - \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow z = 119,26 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
&+ \frac{2 \cdot b \cdot (z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \quad (AIII.25) \\
&= 444,125 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 119,26}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (220 - 260 + 119,26) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 119,26}{2} + \frac{220 - 260 + 119,26}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 60 \times (119,26 - 60 - 60) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{119,26 - 60 - 60}{2} + \frac{260 - 119,26}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 78,76 \text{ kN.m}
\end{aligned}$$

Na Figura AIII.7 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso A.4, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso A.4: EN no banzo superior do perfil		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	506,58 kN	0
Forças Tração	506,58 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	119,26 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	78,76 kN.m	

Figura AIII.7 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.4.

O cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n. e do omento plástico resistente para o Caso A.5, onde o e.n. se localiza nas abas superiores dos perfis “C”, é descrito pela Equação (AIII.26) e (AIII.27), respetivamente.

Forças de compressão = Forças de tração \Leftrightarrow

$$\Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} =$$

$$= N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \quad (AIII.26)$$

$$\Leftrightarrow 444,125 + 67,20 + 2,20 + 66 + 22 + \frac{5 \times (z - 120 - 2) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} =$$

$$= 327,04 - 67,20 - \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow z = 93,57mm$$

$$M_{pl,Rd} = N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) +$$

$$+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) +$$

$$+ \frac{4 \cdot t \cdot (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) +$$

$$+ \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) = \quad (AIII.27)$$

$$= 444,125 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 93,57}{2} \right) \times 10^{-3} + 67,20 \times \left(93,57 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 93,57}{2} \right) \times 10^{-3} +$$

$$+ \frac{4 \times 2 \times (93,57 - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{93,57 - 120 - 2}{2} + \frac{260 - 93,57}{2} \right) \times 10^{-3} +$$

$$+ \frac{5 \times (220 - 260 + 93,57) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 93,57}{2} + \frac{220 - 260 + 93,57}{2} \right) \times 10^{-3} =$$

$$= 71,03kN.m$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.8 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso A.5, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático do Excel.

Caso A.5: EN nas abas superiores do perfil		
		0
Forças plásticas		
Forças Compressão	506,58	kN
Forças Tração	506,58	kN
Profundidade do E.N.		
z	93,57	mm
Momento plástico		
Mpl,Rd	71,03	kN.m

Figura AIII.8 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.5.

Para o Caso A.6, quando o e.n. se situa nos perfis de secção “C” abaixo das abas superiores dos mesmos, o cálculo de verificação realizado manualmente para a determinação de z e $M_{pl,Rd}$, encontra-se descrito nas Equações (AIII.28) e (AIII.29), respetivamente.

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 = & N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \tag{AIII.28} \\
 \Leftrightarrow & 444,125 + 67,20 + 40,32 + 19,80 + 2,20 + 66 + 22 + \frac{5 \times (z - 120 - 20) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \\
 & + \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} = 327,04 - 67,20 - 40,32 - \\
 & - \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & z = 70,15mm
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} = & N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + N_{perfil,abas,sup} \times \left(z - h_{laje} - a + \frac{a - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
 & + \frac{2 \times t \cdot (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - a}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \tag{AIII.29} \\
 = & 444,125 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 70,15}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
 & + \frac{5 \times (220 - 260 + 70,15) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 70,15}{2} + \frac{220 - 260 + 70,15}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
 & + 67,20 \times \left(70,15 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 70,15}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
 & + 40,32 \times \left(70,15 - 120 - 20 + \frac{20 - 2}{2} + \frac{260 - 70,15}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
 & + \frac{2 \times 2 \times (70,15 - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{70,15 - 120 - 20}{2} + \frac{260 - 70,15}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
 = & 63,28kN.m
 \end{aligned}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.9 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso A.6, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático da Ferramenta de Cálculo.

Caso A.6: EN no perfil		
		0
Forças plásticas		
Forças Compressão	506,58 kN	0
Forças Tração	506,58 kN	
Profundidade do E.N.		
z	70,15 mm	
Momento plástico		
Mpl,Rd	63,28 kN.m	

Figura AIII.9 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso A.6.

Posteriormente procedeu-se à determinação da hipótese de cálculo verdadeira, de entre as 6 hipóteses do Caso A, através das condições referidas na Tabela 3.2.

Com base nos cálculos realizados manualmente verificou-se que a hipótese verdadeira era a hipótese A.3, com e.n. na laje da chapa perfilada, como se pode constatar pela Equação (AIII.30).

$$\begin{aligned}
 N_{cf,tot} + N_{chapa,3} &\leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} + N_{chapa,2} \\
 &\wedge \\
 N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} &> N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 444,125 + 22 &\leq 327,04 + 154 + 66 \wedge 444,125 + 66 + 22 > 327,04 + 154 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 466,125 &\leq 547,04 \wedge 532,125 > 481,04 \rightarrow OK!
 \end{aligned}
 \tag{AIII.30}$$

O mesmo se verificou nos cálculos automáticos realizados pela Ferramenta de Cálculo, como se pode visualizar na Figura AIII.10.

Profundidade do E.N.		
z	110,81 mm	EN na chapa perfilada da laje
Momento plástico resistente		
Mpl,Rd	75,12 kN.m	

Figura AIII.10 - Resultado da verificação da hipótese de cálculo correta para o Caso A, obtida através da Ferramenta de Cálculo.

Para o Caso B os dados serão os mesmo que os dados utilizados nos cálculos do Caso A, à exceção da altura a chapa do conector que apenas terá 190 mm, ou seja, não interceta a laje de betão.

Na hipótese de cálculo B.1, em que o e.n. se situa na laje de betão, o cálculo efetuado manualmente para a determinação da profundidade do e.n. é traduzido pela Equação (AIII.31).

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow \frac{b_{\text{eff}} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} = N_{\text{perfil,tot}} + N_{\text{chapa,1}} + N_{\text{chapa,2}} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow \frac{350 \times z \times 0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} = 327,04 + 154 + 55 \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow z = 72,07 \text{ mm}
\end{aligned}
\tag{AIII.31}$$

Para a mesma hipótese de cálculo, o cálculo realizado manualmente para a determinação do momento plástico resistente é traduzido pela Equação (AIII.32).

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{\text{perfil,tot}} \times \left(\frac{1}{2} \cdot h_a + h_{\text{laje}} - \frac{1}{2} \cdot z \right) + (N_{\text{chapa,1}} + N_{\text{chapa,2}}) \times \left(h_{\text{total}} - \frac{1}{2} \cdot h_{\text{chapa}} - \frac{1}{2} \cdot z \right) = \\
&= 327,04 \times \left(\frac{140}{2} + 120 - \frac{72,07}{2} \right) \times 10^{-3} + (154 + 55) \times \left(260 - \frac{190}{2} - \frac{72,07}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 77,31 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.32}$$

Na Figura AIII.11 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso B.1, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso B.1: EN na laje de betão		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	536,04 kN	0
Forças Tração	536,04 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	72,07 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	77,31 kN.m	

Figura AIII.11 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso B.1.

O cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n. e do omento plástico resistente para o Caso B.3, onde o e.n. se localiza na chapa perfilada da laje, é descrito pela Equação (AIII.33) e (AIII.34), respetivamente.

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow N_{cf,tot} + \frac{e_{\text{chapa}} \cdot (z - h_{\text{total}} + h_{\text{chapa}}) \cdot f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} = N_{\text{perfil,tot}} + \frac{e_{\text{chapa}} \cdot (h_{\text{total}} - z) \cdot f_{y,\text{chapa}}}{\gamma_{\text{chapa}}} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow 446,25 + \frac{5 \times (z - 260 + 190) \times 220}{1} \times 10^{-3} = 327,04 + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow z = 110,81 \text{ mm}
\end{aligned}
\tag{AIII.33}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot h_c \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(h_{total} - \frac{h_c}{2} - \frac{h_{total} - z}{2} \right) - \\
&- \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(z - \frac{h_c}{2} - \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) = \\
&= 327,04 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{60}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (260 - 110,81) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 110,81}{2} \right) \times 10^{-3} - \\
&- \frac{5 \times (190 - 260 + 110,81) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(110,81 - \frac{60}{2} - \frac{190 - 260 + 110,81}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 75,12 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.34}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.12 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso B.3, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático da Ferramenta de Cálculo.

Caso B.3: EN na chapa perfilada da laje		
		1
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	491,15 kN	0
Forças Tração	491,15 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	110,81 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	75,12 kN.m	

Figura AIII.12 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso B.3.

Para o Caso B.4, quando o e.n. se situa nos banzos superiores dos perfis “C”, o cálculo de verificação realizado manualmente para a determinação de z e $M_{pl,Rd}$, encontra-se descrito nas Equações (AIII.35) e (AIII.36), respetivamente.

$$\begin{aligned}
& \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje}) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
& = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow 446,25 + 55 + \frac{5 \times (z - 120) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\
& = 327,04 - \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow z = 119,71 \text{ mm}
\end{aligned}
\tag{AIII.35}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
&+ \frac{2 \cdot b \times (z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 119,71}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (190 - 260 + 119,71) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 119,71}{2} + \frac{190 - 260 + 119,71}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 60 \times (119,71 - 60 - 60) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{119,71 - 60 - 60}{2} + \frac{260 - 119,71}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 75,84 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.36}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.13 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso B.4, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático do Excel.

Caso B.4: EN no banzo superior do perfil		
		0
Forças plásticas		
Forças Compressão	491,15 kN	0
Forças Tração	491,15 kN	
Profundidade do E.N.		
z	119,71 mm	
Momento plástico		
Mpl,Rd	75,84 kN.m	

Figura AIII.13 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso B.4.

O cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n. e do omento plástico resistente para o Caso B.5, onde o e.n. se localiza nas abas superiores dos perfis “C”, é descrito pela Equação (AIII.37) e (AIII.38), respetivamente.

Forças de compressão = Forças de tração \Leftrightarrow

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + \\ &+ \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - t) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \\ &= N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \end{aligned} \quad (AIII.37)$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow 446,25 + 67,2 + 2,2 + 55 + \\ &+ \frac{5 \times (z - 120 - 2) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\ &= 327,04 - 67,2 - \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow z = 98,20mm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\ &+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\ &+ \frac{4 \cdot t \cdot (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\ &+ \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) = \end{aligned} \quad (AIII.38)$$

$$\begin{aligned} &= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 98,2}{2} \right) \times 10^{-3} + 67,20 \times \left(98,2 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 98,2}{2} \right) \times 10^{-3} + \\ &+ \frac{4 \times 2 \times (98,2 - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{98,2 - 120 - 2}{2} + \frac{260 - 98,2}{2} \right) \times 10^{-3} + \\ &+ \frac{5 \times (190 - 260 + 98,2) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 98,2}{2} + \frac{190 - 260 + 98,2}{2} \right) \times 10^{-3} = \\ &= 69,71kN.m \end{aligned}$$

Na Figura AIII.14 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso B.5, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso B.5: EN nas abas superiores do perfil		0
Forças plásticas		
Forças Compressão	491,15 kN	0
Forças Tração	491,15 kN	
Profundidade do E.N.		
z	98,20 mm	
Momento plástico		
Mpl,Rd	69,71 kN.m	

Figura AIII.14 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso B.5.

Na hipótese de cálculo B.6, em que o e.n. se situa nos perfis “C” abaixo das abas superiores dos mesmos, o cálculo efetuado manualmente para a determinação da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente é traduzido pela Equação (AIII.39) e (AIII.40), respetivamente.

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} + N_{chapa,1B} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - a) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \quad \text{(AIII.39)} \\
 & \Leftrightarrow 446,25 + 67,2 + 40,32 + 19,8 + 2,2 + 55 + \\
 & + \frac{5 \times (z - 120 - 20) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\
 & = 327,04 - 67,2 - 40,32 - \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow z = 77,1 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (h_{chapa} - h_{total} + z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{h_{chapa} - h_{total} + z}{2} \right) + \\
&+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ N_{perfil,abas,sup} \times \left(z - h_{laje} - a + \frac{a - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ \frac{2 \times t \cdot (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - a}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 77,11}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (190 - 260 + 77,11) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 77,11}{2} + \frac{190 - 260 + 77,11}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ 67,20 \times \left(77,11 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 77,11}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ 40,32 \times \left(77,11 - 120 - 20 + \frac{20 - 2}{2} + \frac{260 - 77,11}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 2 \times (77,11 - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{77,11 - 120 - 20}{2} + \frac{260 - 77,11}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 63,06 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.40}$$

Na Figura AIII.15 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso B.6, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso B.6: EN no perfil		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	491,15 kN	0
Forças Tração	491,15 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	77,11 mm	
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	63,06 kN.m	

Figura AIII.15 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso B.6.

De seguida procedeu-se à determinação da hipótese de cálculo verdadeira, de entre as 5 hipóteses do Caso B, através das condições referidas na Tabela 3.2.

Com base nos cálculos realizados manualmente verificou-se que a hipótese verdadeira era a hipótese B.3, com e.n. na laje da chapa perfilada, como se pode constatar pela Equação (AIII.41).

$$\begin{aligned}
 N_{cf,tot} + N_{chapa,3} &\leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} + N_{chapa,2} \\
 &\wedge \\
 N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} &> N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 446,25 + 0 &\leq 327,04 + 154 + 55 \wedge 446,25 + 55 + 0 > 327,04 + 154 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 446,25 &\leq 536,04 \wedge 501,25 > 481,04 \rightarrow OK!
 \end{aligned}
 \tag{AIII.41}$$

O mesmo se verificou nos cálculos automáticos realizados pela Ferramenta de Cálculo, como se pode visualizar na Figura AIII.16.

Profundidade do E.N.		
z	110,81	mm
EN na chapa perfilada da laje		
Momento plástico resistente		
Mpl,Rd	75,12	kN.m

Figura AIII.16 - Resultado da verificação da hipótese de cálculo correta para o Caso B, obtida através da Ferramenta de Cálculo.

No Caso C, os dados considerados para a verificação dos cálculos automáticos efetuados pelo Excel, foram os mesmos que os dados utilizados no Caso A. Apenas a altura da chapa do conector é que vai variar de modo a abranger todas as hipóteses, no entanto esta vai ser sempre igual ou inferior à altura dos perfis “C”.

Para o Caso C.1, em que o e.n. se situa na laje maciça de betão, a profundidade do e.n. e o momento plástico resistente são determinados manualmente com base nas Equações (AIII.42) e (AIII.43), respetivamente, considerando a altura do conector igual a 140 mm.

$$\begin{aligned}
 \text{Forças de compressão} &= \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{b_{eff} \times z \times 0,85 \times f_{ck}}{\gamma_c} &= N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow \frac{350 \times z \times 0,85 \times 25}{1} \times 10^{-3} &= 327,04 + 154,0 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow z &= 64,68mm
 \end{aligned}
 \tag{AIII.42}$$

$$\begin{aligned}
 M_{pl,Rd} &= N_{perfil,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_a - \frac{1}{2} \cdot z \right) + N_{chapa,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_{chapa} - \frac{1}{2} \cdot z \right) = \\
 &= 327,04 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{64,68}{2} \right) \times 10^{-3} + 154,0 \times \left(260 - \frac{140}{2} - \frac{64,68}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
 &= 75,84kN.m
 \end{aligned}
 \tag{AIII.43}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.17 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso C.1, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático do Excel.

Caso C.1: EN na laje de betão		
		0
Forças plásticas		
Forças Compressão	481,04 kN	0
Forças Tração	481,04 kN	
Profundidade do E.N.		
z	64,68 mm	
Momento plástico		
Mpl,Rd	75,84 kN.m	

Figura AIII.17 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso C.1.

O cálculo da determinação de z para o Caso C.4, onde o e.n. se situa nos banzos superiores dos perfis “C”, pode ser traduzido por duas equações (AIII.44) e (AIII.45), uma considerando a altura do conector igual a 140 mm e a segunda considerando igual a 100 mm.

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N_{cf,tot} + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow & \quad (AIII.44) \\
 \Leftrightarrow 446,25 + \frac{5 \times (z - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\
 = 327,04 - \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow z = 120,50mm
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow N_{cf,tot} + \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} = N_{perfil,tot} - \frac{2 \times b \times (z - h_{laje}) \times f_y}{\gamma_a} + N_{chapa,tot} \Leftrightarrow & \quad (AIII.45) \\
 \Leftrightarrow 446,25 + \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} = 327,04 - \frac{2 \times 60 \times (z - 120) \times 280}{1} \times 10^{-3} + 110 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow z = 119,86mm
 \end{aligned}$$

Para a mesma hipótese o cálculo de $M_{pl,Rd}$ também é efetuado através de duas Equações (AIII.46) e (AIII.47), considerando as alturas da chapa do conector de 140 mm e 100 mm, respetivamente.

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right) + \\
&+ \frac{2 \cdot b(z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 120,5}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (120,5 - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 120,5}{2} + \frac{120,5 - 120 - (140 - 140)}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 60 \times (120,5 - 60 - 60) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{120,5 - 60 - 60}{2} + \frac{260 - 120,5}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 72,73kN.m
\end{aligned} \tag{AIII.46}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{2 \cdot b(z - h_c - h_p) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_a}{2} - \frac{h_{chapa}}{2} \right) = \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 119,86}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 60 \times (119,86 - 60 - 60) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{119,86 - 60 - 60}{2} + \frac{260 - 119,86}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times 100 \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{140}{2} - \frac{100}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 73,25kN.m
\end{aligned} \tag{AIII.47}$$

Na Figura AIII.18 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso C.4, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso C.4: EN no banzo superior do perfil			Caso C.4: EN no banzo superior do perfil		
		1			0
<u>Forças plásticas</u>			<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	463,65 kN	0	Forças Compressão	441,65 kN	0
Forças Tração	463,65 kN		Forças Tração	441,65 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>			<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	120,50 mm		z	119,86 mm	
<u>Momento plástico</u>			<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	72,73 kN.m		Mpl,Rd	73,25 kN.m	

(a) (b)

Figura AIII.18 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso C.4: (a) $h_{chapa} = 140$ mm; (b) $h_{chapa} = 100$ mm.

Para o Caso C.5, em que o eixo neutro se situa nas abas superiores dos perfis “C”, o cálculo da profundidade do e.n. é efetuado com base em duas Equações (AIII.48) e (AIII.49), tendo em conta que a altura da chapa do conector é igual a 140 mm e a 100 mm, respetivamente. O momento plástico resistente é calculado de acordo com as Equações (AIII.50) e (AIII.51), sendo a altura da chapa do conector de 140 mm e de 100 mm, respetivamente.

$$\text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + \\ &+ \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \\ &= N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \quad (\text{AIII.48}) \\ &\Leftrightarrow 446,25 + 67,2 + \\ &+ \frac{5 \times (z - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\ &= 327,04 - 67,2 - \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow z = 106,43 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} = \\ &= N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - \frac{4 \times t \times (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} + N_{chapa,tot} \Leftrightarrow \quad (\text{AIII.49}) \\ &\Leftrightarrow 446,25 + 67,2 + \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\ &= 327,04 - 67,2 - \frac{4 \times 2 \times (z - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} + 110 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow z = 89,94 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ \frac{4 \cdot t (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right) = \tag{AIII.50} \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 106,43}{2} \right) \times 10^{-3} + 67,2 \times \left(106,43 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 106,43}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{4 \times 2 \times (106,43 - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{106,43 - 120 - 2}{2} + \frac{260 - 106,43}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (106,43 - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 106,43}{2} + \frac{106,43 - 120 - (140 - 140)}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 69,10 kN.m
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ \frac{4 \cdot t (z - h_{laje} - t) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) \\
&+ \frac{e_{chapa} \times h_{chapa} \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_a}{2} - \frac{h_{chapa}}{2} \right) = \tag{AIII.51} \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 89,94}{2} \right) \times 10^{-3} + 67,2 \times \left(89,94 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 89,94}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{4 \times 2 \times (89,94 - 120 - 2) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{89,94 - 120 - 2}{2} + \frac{260 - 89,94}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times 100 \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{140}{2} - \frac{100}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 65,57 kN.m
\end{aligned}$$

Como se pode constatar pela Figura AIII.19 os resultados dos cálculos efetuados manualmente para o Caso C.5, apresentam o mesmo valor que os cálculos automático da Ferramenta de Cálculo.

Caso C.5: nas abas superiores do perfil			Caso C.5: nas abas superiores do perfil		
0			0		
<u>Forças plásticas</u>			<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	463,65 kN	0	Forças Compressão	441,64 kN	0
Forças Tração	463,65 kN		Forças Tração	441,65 kN	
<u>Profundidade do E.N.</u>			<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	106,43 mm		z	89,94 mm	
<u>Momento plástico</u>			<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	69,10 kN.m		Mpl,Rd	65,57 kN.m	

Figura AIII.19 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso C.5. (a) $h_{chapa} = 140$ mm; (b) $h_{chapa} = 100$ mm.

Por fim no Caso C.6, quando o e.n. se localiza nos perfis “C” abaixo das abas superiores dos mesmos, a profundidade do eixo neutro é calculada com base na Equação (AIII.52) e o momento plástico resistente é calculado com base na Equação (AIII.53). Estes cálculos foram realizados com uma altura da chapa do conector de 140 mm.

$$\begin{aligned}
 & \text{Forças de compressão} = \text{Forças de tração} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & N_{cf,tot} + N_{perfil,banzos,sup} + N_{perfil,abas,sup} + \\
 & + \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} + \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} = \\
 & = N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} - N_{perfil,abas,sup} - \\
 & - \frac{2 \times t \times (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} + \frac{e_{chapa} \times (h_{total} - z) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \Leftrightarrow \tag{AIII.52} \\
 \Leftrightarrow & 446,25 + 67,2 + 40,32 + \\
 & + \frac{5 \times (z - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} + \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} = \\
 & = 327,04 - 67,2 - 40,32 - \\
 & - \frac{2 \times 2 \times (z - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} + \frac{5 \times (260 - z) \times 220}{1} \times 10^{-3} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow & z = 89,49 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{pl,Rd} &= N_{cf,tot} \times \left(h_{total} - \frac{1}{2} \cdot h_c - \left(\frac{h_{total} - z}{2} \right) \right) + \\
&+ \frac{e_{chapa} \times (z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})) \times f_{y,chapa}}{\gamma_{chapa}} \times \left(\frac{h_{total} - z}{2} + \frac{z - h_{laje} - (h_a - h_{chapa})}{2} \right) + \\
&+ N_{perfil,banzos,sup} \times \left(z - h_{laje} - \frac{t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ N_{perfil,abas,sup} \times \left(z - h_{laje} - a + \frac{a - t}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) + \\
&+ \frac{2 \times t \cdot (z - h_{laje} - a) \times f_y}{\gamma_a} \times \left(\frac{z - h_{laje} - a}{2} + \frac{h_{total} - z}{2} \right) = \\
&= 446,25 \times \left(260 - \frac{60}{2} - \frac{260 - 89,49}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{5 \times (89,49 - 120 - (140 - 140)) \times 220}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{260 - 89,49}{2} + \frac{89,49 - 120 - (140 - 140)}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ 67,2 \times \left(89,49 - 120 - \frac{2}{2} + \frac{260 - 89,49}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ 40,32 \times \left(89,49 - 120 - 20 + \frac{20 - 2}{2} + \frac{260 - 89,49}{2} \right) \times 10^{-3} + \\
&+ \frac{2 \times 2 \times (89,49 - 120 - 20) \times 280}{1} \times 10^{-3} \times \left(\frac{89,49 - 120 - 20}{2} + \frac{260 - 89,49}{2} \right) \times 10^{-3} = \\
&= 64,23 \text{ kN.m}
\end{aligned}
\tag{AIII.53}$$

Na Figura AIII.20 estão representados os resultados dos cálculos automático efetuados pela Ferramenta de Cálculo, para o Caso C.6, e como se pode ver os valores são os mesmos do que os calculados manualmente.

Caso C.6: EN no perfil		
		0
<u>Forças plásticas</u>		
Forças Compressão	463,65	kN
Forças Tração	463,65	kN
0		
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	89,49	mm
<u>Momento plástico</u>		
Mpl,Rd	64,23	kN.m

Figura AIII.20 - Resultados da profundidade do e.n. e do momento plástico resistente, obtidos na Ferramenta de Cálculo para o Caso C.6.

De seguida procedeu-se à determinação da hipótese de cálculo verdadeira, ou seja, de entre as 4 hipóteses do Caso C apenas uma será a mais correta para o provete selecionado.

Através das condições referidas na Tabela 3.2 e com base nos cálculos realizados manualmente verificou-se que a hipótese verdadeira, para uma altura de conector de 140 mm, era a hipótese

B.4, com e.n. nos banzos superiores dos perfis “C”, como se pode constatar pela Equação (AIII.54). Para uma altura da chapa do conector de 100 mm, a hipótese correta é a C.1, com e.n. na laje de betão, como se pode verificar na Equação (AIII.55).

$$\begin{aligned}
 N_{cf,tot} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} &\leq N_{perfil,tot} + N_{chapa,1} \\
 &\wedge \\
 N_{cf,tot} + N_{chapa,1C} + N_{chapa,2} + N_{chapa,3} + N_{perfil,banzos,sup} &> \\
 > N_{perfil,tot} - N_{perfil,banzos,sup} + N_{chapa,1A} + N_{chapa,1B} &\Leftrightarrow \quad (AIII.54) \\
 \Leftrightarrow 446,25 + 0 + 0 &\leq 327,04 + 154 \\
 &\wedge \\
 446,25 + 2,2 + 0 + 0 + 67,2 &> 327,04 - 67,2 + 132 + 19,8 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 446,25 &\leq 481,04 \wedge 515,65 > 411,64 \rightarrow OK!
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{cf,1} &> N_{perfil,tot} + N_{chapa,tot} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 446,25 &> 327,04 + 110 \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 446,25 &> 437,04 \rightarrow OK! \quad (AIII.55)
 \end{aligned}$$

O mesmo se verificou nos cálculos automáticos realizados pela Ferramenta de Cálculo, como se pode visualizar na Figura AIII.21.

Profundidade do E.N.			Profundidade do E.N.		
z	120,50 mm	EN no banzo superior do perfil	z	58,76 mm	EN na laje de betão
Momento plástico resistente			Momento plástico resistente		
Mpl,Rd	72,73 kN.m		Mpl,Rd	72,40 kN.m	

(a) (b)

Figura AIII.21 - Resultado da verificação da hipótese de cálculo correta para o Caso C, obtida através da Ferramenta de Cálculo. (a) $h_{chapa} = 140$ mm; (b) $h_{chapa} = 100$ mm.

AIII.2 Características elásticas

Para o cálculo das características elásticas os dados utilizados foram os adotados inicialmente. Primeiramente efetuou-se o cálculo manual do centro de gravidade da secção total, como se pode verificar através da Equação (AIII.56), que deu um resultado igual ao da folha de cálculo do Excel como se pode constatar pela Figura AIII.22.

$$\begin{aligned}
y_G &= \frac{2 \times A_a \times \frac{h_a}{2} + \frac{b_{eff}}{n} \times h_c \times \left(\frac{h_c}{2} + h_p + h_a \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \frac{h_{chapa}}{2}}{2 \times A_a + \frac{b_{eff}}{n} \times h_c + e_{chapa} \times h_{chapa}} = \\
&= \frac{2 \times 584 \times \frac{140}{2} + \frac{350}{6,67} \times 60 \times \left(\frac{60}{2} + 60 + 140 \right) + 5 \times 220 \times \frac{220}{2}}{2 \times 584 + \frac{350}{6,67} \times 60 + 5 \times 220} = \\
&= 171,14mm
\end{aligned} \tag{AIII.56}$$

O cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n., do momento de inércia e das tensões máximas de tração nas fibras inferiores do perfil de aço e de compressão nas fibras superiores da laje de betão para o Caso A, onde o e.n. se situa na laje de betão, encontra-se representado nas Equações(AIII.57), (AIII.58), (AIII.59) e (AIII.60).

$$\begin{aligned}
S_c &= S_a \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow \frac{b_{eff}}{n} \times \frac{z^2}{2} &= 2 \cdot A_a \times \left(\frac{h_a}{2} + h_p + h_c - z \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - z - \frac{h_{chapa}}{2} \right) \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow \frac{350}{6,67} \times \frac{z^2}{2} &= 2 \times 584 \times \left(\frac{140}{2} + 60 + 60 - z \right) + 5 \times 220 \times \left(260 - z - \frac{220}{2} \right) \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow z &= 85,66mm
\end{aligned} \tag{AIII.57}$$

$$\begin{aligned}
I_m &= (2 \cdot I_a + 2 \cdot A_a \times d_a^2) + (I_c + A_c \times d_c^2) + (I_{chapa} + A_{chapa} \times d_{chapa}^2) = \\
&= \left(2 \times 1813987 + 2 \times 584 \times \left(\frac{140}{2} + 60 + 60 - z \right)^2 \right) + \\
&+ \left(\frac{\frac{350}{6,67} \times 85,66^3}{12} + \frac{350}{6,67} \times 85,66 \times \left(\frac{85,66}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{5 \times 220^3}{12} + 5 \times 220 \times \left(260 - 85,66 - \frac{220}{2} \right)^2 \right) = \\
&= 3,63 \times 10^7 mm^4
\end{aligned} \tag{AIII.58}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_a &= \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z_m = \\
&= \frac{56,20 \times 10^6}{3,63 \times 10^7} \times (260 - 85,66) = \\
&= 269,7MPa
\end{aligned} \tag{AIII.59}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_c &= \frac{1}{n} \cdot \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z = \\
&= \frac{1}{6,67} \times \frac{56,20 \times 10^6}{3,63 \times 10^7} \times 85,66 = \\
&= 19,88 MPa
\end{aligned}
\tag{AIII.60}$$

Para o Caso B e C, e.n. na chapa perfilada e e.n. no perfil, respetivamente, o cálculo realizado manualmente da profundidade do e.n., do momento de inércia e das tensões máximas de tração nas fibras inferiores do perfil de aço e de compressão nas fibras superiores da laje de betão, encontra-se descrito nas Equações (AIII.61), (AIII.62), (AIII.63) e (AIII.64).

$$\begin{aligned}
S_c &= S_a \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow z &= \frac{\frac{b_{eff}}{n} \times \frac{h_c^2}{2} + 2 \cdot A_a \times \left(h_{total} - \frac{h_a}{2} \right) + e_{chapa} \times h_{chapa} \times \left(h_{total} - \frac{h_{chapa}}{2} \right)}{\frac{b_{eff}}{n} \times h_c + 2 \cdot A_a + e_{chapa} \times h_{chapa}} \Leftrightarrow
\end{aligned}
\tag{AIII.61}$$

$$\begin{aligned}
\Leftrightarrow z &= \frac{\frac{350}{6,67} \times \frac{60^2}{2} + 2 \times 584 \times \left(260 - \frac{140}{2} \right) + 5 \times 220 \times \left(260 - \frac{220}{2} \right)}{\frac{350}{6,67} \times 60 + 2 \times 584 + 5 \times 220} \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow z = 88,86 mm$$

$$\begin{aligned}
I_m &= \left(2 \cdot I_a + 2 \cdot A_a \times d_a^2 \right) + \left(I_c + A_c \times d_c^2 \right) + \left(I_{chapa} + A_{chapa} \times d_{chapa}^2 \right) = \\
&= \left(2 \times 1813987 + 2 \times 584 \times \left(\frac{140}{2} + 60 + 60 - 88,86 \right)^2 \right) + \\
&+ \left(\frac{\frac{350}{6,67} \times 60^3}{12} + \frac{350}{6,67} \times 60 \times \left(88,86 - \frac{60}{2} \right)^2 \right) + \left(\frac{5 \times 220^3}{12} + 5 \times 220 \times \left(260 - 88,86 - \frac{220}{2} \right)^2 \right) = \\
&= 3,598 \times 10^7 \text{ mm}^4
\end{aligned}
\tag{AIII.62}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_a &= \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z_m = \\
&= \frac{56,20 \times 10^6}{3,598 \times 10^7} \times (260 - 88,86) = \\
&= 267,32 MPa
\end{aligned}
\tag{AIII.63}$$

$$\sigma_c = \frac{1}{n} \cdot \frac{M_{Ed}}{I_m} \times z =$$

$$= \frac{1}{6,67} \times \frac{56,20 \times 10^6}{3,598 \times 10^7} \times 88,86 =$$

$$= 20,82 \text{ MPa}$$
(AIII.64)

A Figura AIII.22 demonstra que os cálculos realizados manualmente têm como resultado os mesmos valores que os cálculos automáticos efetuados na folha de cálculo do Excel.

Hipoteses de Cálculo		
yg,total	171,14	mm
Caso A: EN na laje de betão		
<u>Profundidade do E.N.</u>		
a	26,25	mm
b	2268,00	mm
c	-386920,00	mm
z	85,66	mm
<u>Momento de inércia</u>		
Ic	2750300,39	mm ⁴
Ichapa	4436666,67	mm ⁴
dc	42,83	mm
da	104,34	mm
dchapa	64,34	mm
Im	36333546,32	mm ⁴
<u>Tensões</u>		
zm	174,34	mm
σa	269,67	MPa
σc	19,88	MPa
Caso B: EN na laje da chapa perfilada ou no perfil		
<u>Profundidade do E.N.</u>		
z	88,86	mm
<u>Momento de inércia</u>		
Ic	945000,00	mm ⁴
Ichapa	4436666,67	mm ⁴
dc	58,86	mm
da	101,14	mm
dchapa	61,14	mm
Im	35982545,8	mm ⁴
<u>Tensões</u>		
zm	171,14	mm
σa	267,32	MPa
σc	20,82	MPa

Figura AIII.22 - Resultados do centro de gravidade da secção total, da profundidade do eixo neutro, do momento de inércia e das tensões máximas, obtidos na Ferramenta de Cálculo para os Casos A e B.

No final destes cálculos é necessário determinar a posição do e.n., ou seja, determinar em que Caso o provete se encontra. Sendo assim, efetuou-se os cálculos manualmente para confirmar se a folha de cálculo esta a conceder resultados verídicos. A posição do e.n., para os dados inseridos, é na laje da chapa perfilada, como se pode constatar através da Equação (AIII.65)

$$y_G > h_a \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 171,14 > 140 \rightarrow \text{OK!}$$
(AIII.65)

Na Figura AIII.23 é possível verificar que na Ferramenta de Cálculo também se verificou que o e.n. situa-se na laje da chapa perfilada, bem como as tensões obtidas para esse Caso de cálculo.

Posição do eixo neutro		
EN na laje da chapa perfilada		

Verificações das tensões		
σ_a	✓	267,32 MPa
σ_c	✓	20,82 MPa

Figura AIII.23 - Resultados obtidos da posição do e.n. bem como das tensões máximas no aço e no betão, para o Caso de cálculo verificado.

AIII.3 Deformação

Os dados utilizados para o cálculo da deformação são os mesmos que foram empregues nos cálculos das características elásticas. Como nas características elásticas o e.n. se encontrava na chapa perfilada da laje, ou seja, estávamos perante o Caso B, o momento de inércia utilizado no cálculo da deformação vai ser igual a 35982545,8 mm⁴.

Para confirmar os resultados da flecha máxima, realizou-se os cálculos manualmente como se pode verificar através da Equação (AIII.66). Na Figura AIII.24 está representado o resultado da flecha máxima a meio vão obtido na Ferramenta de Cálculo, e como se pode visualizar o valor é igual ao calculado na Equação (AIII.66).

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) = \\
 &= \frac{\frac{143}{2} \times 10^3 \times 786,05}{24 \times (210 \times 10^3 \times 3,598 \times 10^7)} \times (3 \times 2172,1^2 - 4 \times 786,05^2) = \\
 &= 3,62 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{AIII.66}$$

Deformação (ELS)		
Posição do eixo neutro		Flecha máxima
EN na laje da chapa perfilada		f 3,62 mm
Cálculos Auxiliares		
yg,total	171,14	mm
Profundidade do E.N.		
z	88,86	mm
Momento de inércia		
Im	35982545,8	mm ⁴
Rigidez		
EI	7,56E+12	Nmm ²

Figura AIII.24 - Resultado obtido na Ferramenta de Cálculo da flecha máxima a meio vão.

AIII.4 Conexão

AIII.4.1 Esforço Rasante

Os dados utilizados para o cálculo do esforço rasante foram os mesmos que os dados utilizados no cálculo das características elásticas, e, portanto, o e.n. situa-se na chapa perfilada da laje.

O cálculo realizado para o esforço rasante encontra-se na Equação (AIII.67) com momento de inércia, já calculado anteriormente, igual a $35982545,8 \text{ mm}^4$.

$$\begin{aligned} r_{Ed} &= V_{Ed}(x) \times \frac{S_c}{I_m} = \\ &= \frac{143}{2} \times \frac{\frac{350}{6,67} \times 60 \times \left(88,86 - \frac{60}{2}\right) \times 10^{-9}}{3,598 \times 10^7 \times 10^{-12}} = \\ &= 368,3 \text{ kN/m} \end{aligned} \quad (\text{AIII.67})$$

Como se pode verificar na Figura AIII.25, o resultado obtido na folha de cálculo apresenta o mesmo valor que o calculado manualmente.

Esforço Rasante (conexão não dúctil)	
Posição do eixo neutro	
EN na laje da chapa perfilada	
Esforço rasante	
r	368,39 kN/m
Cálculos Auxiliares	
yg, total	171,14 mm
Profundidade do E.N.	
z	88,86 mm
Momento estático no betão	
Sc	185395,35 mm ²
Momento de inércia	
Im	35982545,8 mm ⁴
Esforço transversal atuante	
V	71,5 kN

Figura AIII.25 - Resultado do esforço rasante, obtido na Ferramenta de Cálculo.

AIII.4.2 Resistência ao corte do conector Indentado

Para o cálculo da resistência do conector de chapa lisa do tipo Indentado, foram utilizados os dados inicialmente propostos, mas com a altura da chapa do conector de 140 mm e não de 220 mm.

Utilizando os coeficientes de regressão propostos por Veríssimo (2007), o cálculo manual é traduzido pelas Equações (AIII.68), (AIII.69), (AIII.70) e (AIII.71) . Nesta equação a primeira parcela foi multiplicada por zero, pois no nosso caso de estudo não existe a força de compressão na face frontal do conector.

$$\begin{aligned} A_{cc} &= \frac{L}{2} \times (h_{total} - h_{chapa} - h_{ranhuras}) + n_{aberturas} \times \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \\ &= \frac{21721}{2} \times (260 - 140 - 80) + 6 \times \frac{\pi \times 80^2}{4} = \\ &= 73601,29mm^2 \end{aligned} \quad (AIII.68)$$

$$A_{sf} = \frac{n_{barras,transv.}}{2} \times \frac{\pi \cdot (\phi_{transv.})^2}{4} = \frac{22}{2} \times \frac{\pi \times 8^2}{4} = 552,92mm^2 \quad (AIII.69)$$

$$\rho \leq \begin{cases} \left(\frac{A_{sf}}{A_{cc}} \right) = \frac{552,92}{73601,29} = 0,008 \\ 0,01 \end{cases} \quad (AIII.70)$$

$$\begin{aligned} q &= B_1 \times \sqrt{\frac{h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a}{h_c + h_p}} \times (h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a) \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \times \beta + \\ &+ B_2 \times n_{aberturas} \times D^2 \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_3 \times A_{cc} \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_4 \times 5 \times 10^6 \times \rho = \\ &= 1,96 \times \sqrt{\frac{140+80-140}{60+60}} \times (140+80-140) \times 5 \times \frac{25}{1} \times 10^{-3} \times 0 + 2,72 \times 6 \times 80^2 \times \sqrt{\frac{25}{1}} \times 10^{-3} + \\ &+ 0,07 \times 73601,29 \times \sqrt{\frac{25}{1}} + 3,57 \times 5 \times 10^6 \times 0,008 \times 10^{-3} = \\ &= 682,10kN \end{aligned} \quad (AIII.71)$$

Utilizando os coeficientes de regressão propostos por Vieira (2009), o cálculo manual é traduzido pelas Equações (AIII.68), (AIII.69), (AIII.72), (AIII.73) e (AIII.74). Nesta equação o coeficiente β também é igual a zero.

$$A_{aberturas} = 109 \times 80 = 8720 \text{ mm}^2 \quad (\text{AIII.72})$$

$$\rho \leq \begin{cases} \left(\frac{A_{sf}}{Acc} \right) = 0,008 \\ 0,013 \end{cases} \quad (\text{AIII.73})$$

$$\begin{aligned} q &= B_1 \times \sqrt{\frac{h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a}{h_c + h_p}} \times (h_{chapa} + h_{ranhuras} - h_a) \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \times \beta + \\ &+ B_2 \times n_{aberturas} \times h_{ranhuras} \times e_{chapa} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + \\ &+ B_3 \times n_{aberturas} \times A_{aberturas} \times \sqrt{\frac{f_{ck}}{\gamma_c}} + B_4 \times 5 \times 10^5 \times \rho = \quad (\text{AIII.74}) \\ &= 3,56 \times \sqrt{\frac{140 + 80 - 140}{60 + 60}} \times (140 + 80 - 140) \times 5 \times \frac{25}{1} \times 10^{-3} \times 0 + 0,536 \times 6 \times 80 \times 5 \times \frac{25}{1} \times 10^{-3} + \\ &+ 1,62 \times 6 \times 8720 \times \sqrt{\frac{25}{1}} \times 10^{-3} + 28,76 \times 5 \times 10^5 \times 0,008 \times 10^{-3} = \\ &= 563,98 \text{ kN} \end{aligned}$$

Como se pode observar na Figura AIII.26, os resultados obtidos na Ferramenta de Cálculo da resistência de corte do conector *Indentado*, estão de acordo com os cálculos efetuados manualmente.

Resistência ao corte	
q	682,10 kN

(a)

Resistência ao corte	
q	563,98 kN

(b)

Figura AIII.26 - Resultados da resistência ao corte do conector *Indentado*, obtido na Ferramenta de Cálculo, com $h_{chapa} = 140$ mm: (a) Coeficientes de regressão definidos por Veríssimo (2007); (b) Coeficientes de regressão definidos por Vieira (2009).

AIII.4.3 Resistência ao corte do conector Xadrez

Os dados presentes para o cálculo da resistência ao corte do conector de chapa nervurada do tipo Xadrez, são os propostos inicialmente, com altura da chapa do conector de 220 mm.

As Equações (AIII.75) e (AIII.76) traduzem o cálculo realizado manualmente para a determinação da tensão tangencial máxima e para a determinação da resistência de corte do conector Xadrez, respetivamente. As variáveis utilizadas na equação da tensão tangencial máxima, são as propostas por Thomann & Lebet (2007).

$$\begin{aligned}\tau_{m\acute{a}x} &= \tau_f + \tau_b = \mu \cdot \sigma + \kappa \cdot m \cdot A' \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \left(1 + \frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = \\ &= 0,72 \times 0,5 + 0,73 \times 0,051 \times 0,13 \times \frac{25}{1} \times \left(1 + \frac{0,5}{0,7}\right) = \\ &= 0,57 MPa\end{aligned}\tag{AIII.75}$$

$$g = \tau_{m\acute{a}x} \times A_{chapa,long.} = 0,57 \times \left(2 \times 220 \times \frac{2172,1}{2}\right) \times 10^{-3} = 271,2 kN\tag{AIII.76}$$

Como se pode visualizar na Figura AIII.27, os resultados obtidos a partir da Ferramenta desenvolvida são iguais aos resultados aqui calculados manualmente, o que significa que o cálculo automático do Excel se encontra correto.

$\tau_{m\acute{a}x}$	0,57 MPa
Resistência ao corte	
g	271,2 kN

Figura AIII.27 - Resultados obtidos na Ferramenta de Cálculo, com variáveis definidas por Thomann & Lebet (2007): (a) Tensão tangencial máxima; (b) Resistência de corte do conector Xadrez.

Anexo V

(Síntese dos Modelos Numéricos com Material de Interface)

Tabela AV.1 – Características do material de interface para o modelo numérico 4.

MODELO 4		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface	$K_{tt} = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$	
	$f_t = 100 \text{ MPa}$	
	$C = 4 \text{ MPa}$	
	Friction coefficient = 0	
	$K_{tt, \min} = 8,0 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn, \min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$	
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.2 - Características do material de interface para o modelo numérico 5.

MODELO 5

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 2 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt, \min} = 8,0 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn, \min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.3 - Características do material de interface para o modelo numérico 6.

MODELO 6		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface		$K_{tt} = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$
		$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$
		$f_t = 100 \text{ MPa}$
		$C = 1,5 \text{ MPa}$
		Friction coefficient = 0
		$K_{tt,min} = 8,0 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$
		$K_{nn,min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.4 - Características do material de interface para o modelo numérico 7.

MODELO 7

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 1 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt,\min} = 8,0 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn,\min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.5 - Características do material de interface para o modelo numérico 8.

MODELO 8		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface	$K_{tt} = 8,0 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$	
	$f_t = 100 \text{ MPa}$	
	$C = 0,6 \text{ MPa}$	
	Friction coefficient = 0	
	$K_{tt,min} = 8,0 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn,min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$	
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.6 - Características do material de interface para o modelo numérico 9.

MODELO 9

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 11 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 4 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt,\min} = 11 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn,\min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.7 - Características do material de interface para o modelo numérico 10.

MODELO 10		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface	$K_{tt} = 11 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$	
	$f_t = 100 \text{ MPa}$	
	$C = 2 \text{ MPa}$	
	Friction coefficient = 0	
	$K_{tt,min} = 11 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn,min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$	
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.8 - Características do material de interface para o modelo numérico 11.

MODELO 11

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 11 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 1,5 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt,\min} = 11 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn,\min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.9 - Características do material de interface para o modelo numérico 12.

MODELO 12		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface	$K_{tt} = 11 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$	
	$f_t = 100 \text{ MPa}$	
	$C = 1 \text{ MPa}$	
	Friction coefficient = 0	
	$K_{tt,min} = 11 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn,min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$	
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.10 - Características do material de interface para o modelo numérico 13.

MODELO 13

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 11 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 0,6 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt,\min} = 11 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn,\min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.11 - Características do material de interface para o modelo numérico 14.

MODELO 14		
- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez		
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez		
Materiais: interface do conector com a laje de betão		
Lei: CC3D interface	$K_{tt} = 2000 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$	
	$f_t = 100 \text{ MPa}$	
	$C = 4 \text{ MPa}$	
	Friction coefficient = 0	
	$K_{tt,min} = 2000 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$	
	$K_{nn,min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$	
Function for Cohesion softening / hardening		
Ponto	$\delta v_f \text{ (m)}$	c/c_0
1	0	1
2	0,01	1

Tabela AV.12 - Características do material de interface para o modelo numérico 15.

MODELO 15

- Viga mista de laje nervurada com conector Xadrez
- Viga mista de laje maciça com conector Xadrez

Materiais: interface do conector com a laje de betão

Lei: CC3D interface

$$K_{tt} = 70 \times 10^3 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn} = 2,0 \times 10^8 \text{ MN/m}^3$$

$$f_t = 100 \text{ MPa}$$

$$C = 4 \text{ MPa}$$

$$\text{Friction coefficient} = 0$$

$$K_{tt,\min} = 70 \times 10^1 \text{ MN/m}^3$$

$$K_{nn,\min} = 2,0 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$$

Function for Cohesion softening / hardening

Ponto	δv_f (m)	c/c ₀
1	0	1
2	0,01	1

Anexo V

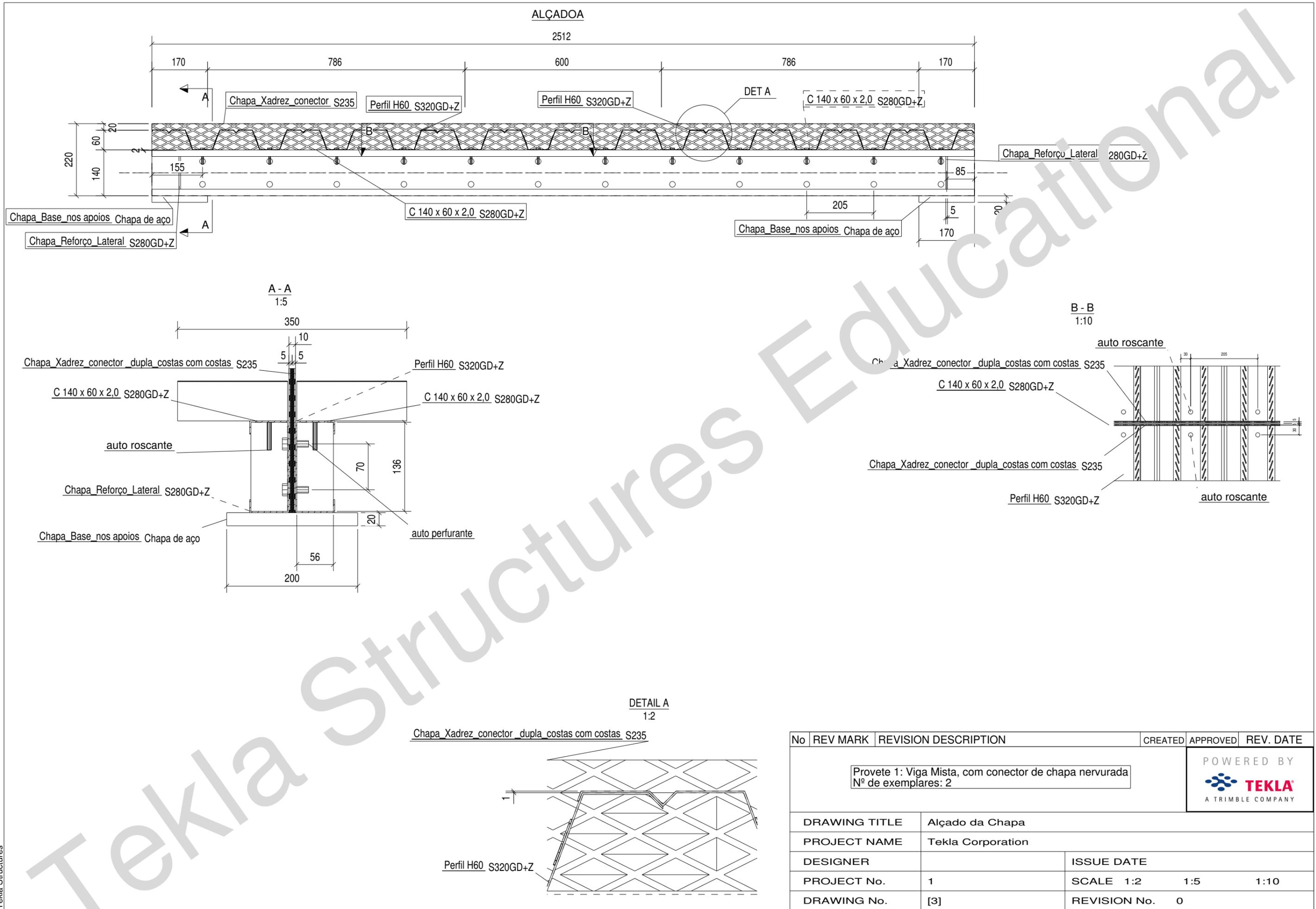
(Síntese das Cargas Máximas dos Modelos Numéricos)

Tabela AV.1 – Cargas Máximas dos Modelos Numéricos.

	Laje	Conector	Coesão (MPa)	Rigidez Tangencial (MN/m ³)	Carga Máxima (kN)
Modelo 1A	Nervurada	Xadrez	ilimitada	ilimitada	227,24
	Maciça	Xadrez	ilimitada	ilimitada	284,56
Modelo 1B	Nervurada	Indentado	ilimitada	ilimitada	187,32
	Maciça	Indentado	ilimitada	ilimitada	179,16
Modelo 2	Nervurada	Indentado	ilimitada	ilimitada	121,12
	Maciça	Indentado	ilimitada	ilimitada	154,84
Modelo 3	Nervurada	Indentado	ilimitada	ilimitada	117,64
	Maciça	Indentado	ilimitada	ilimitada	147,04
Modelo 4	Nervurada	Xadrez	4	8,0x10 ³	81,76
	Maciça	Xadrez	4	8,0x10 ³	249,88
Modelo 5	Nervurada	Xadrez	2	8,0x10 ³	56,36
	Maciça	Xadrez	2	8,0x10 ³	138,40
Modelo 6	Nervurada	Xadrez	1,5	8,0x10 ³	45,24
	Maciça	Xadrez	1,5	8,0x10 ³	108,32
Modelo 7	Nervurada	Xadrez	1	8,0x10 ³	28,83
	Maciça	Xadrez	1	8,0x10 ³	64,12
Modelo 8	Nervurada	Xadrez	0,6	8,0x10 ³	22,86
	Maciça	Xadrez	0,6	8,0x10 ³	57,12
Modelo 9	Nervurada	Xadrez	4	11,0x10 ³	89,00
	Maciça	Xadrez	4	11,0x10 ³	247,4
Modelo 10	Nervurada	Xadrez	2	11,0x10 ³	51,00
	Maciça	Xadrez	2	11,0x10 ³	131,88
Modelo 11	Nervurada	Xadrez	1,5	11,0x10 ³	40,12
	Maciça	Xadrez	1,5	11,0x10 ³	100,00
Modelo 12	Nervurada	Xadrez	1	11,0x10 ³	29,04
	Maciça	Xadrez	1	11,0x10 ³	67,52
Modelo 13	Nervurada	Xadrez	0,6	11,0x10 ³	22,84
	Maciça	Xadrez	0,6	11,0x10 ³	57,4
Modelo 14	Nervurada	Xadrez	4	2000,0x10 ³	147,72
Modelo 15	Nervurada	Xadrez	4	70,0x10 ³	70,72

Anexo VI

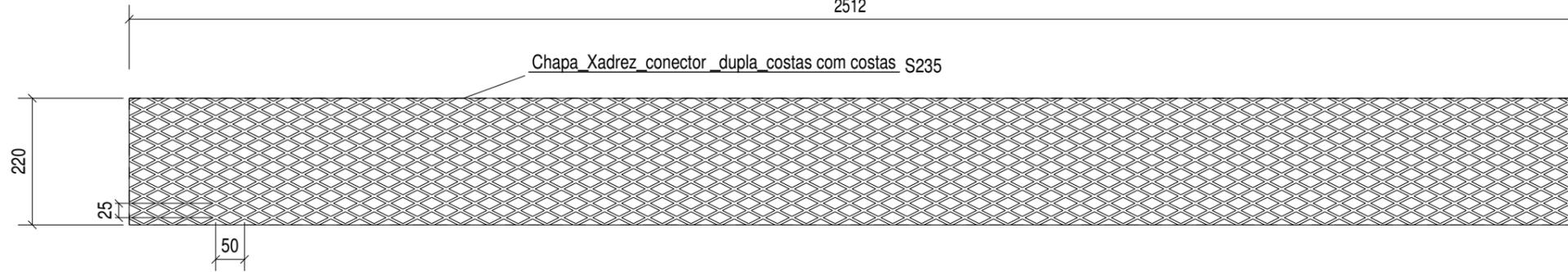
(Desenhos para a Fabricação dos Provetes)



No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
Provete 1: Viga Mista, com conector de chapa nervurada N° de exemplares: 2					
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER		ISSUE DATE			
PROJECT No.		1	SCALE 1:2	1:5	1:10
DRAWING No.		[3]	REVISION No.		0

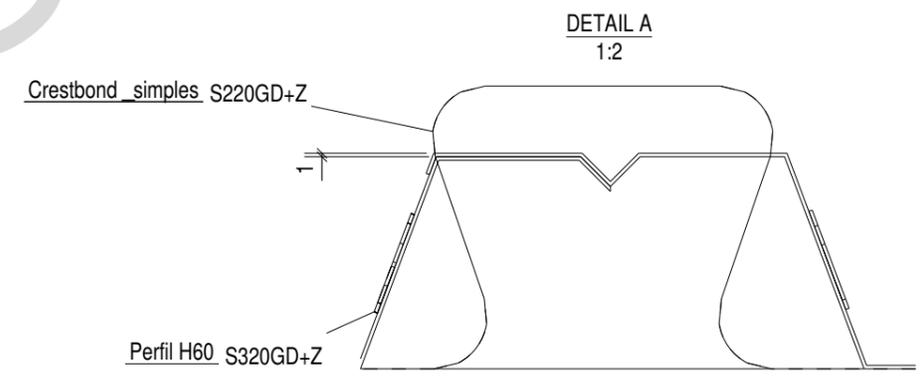
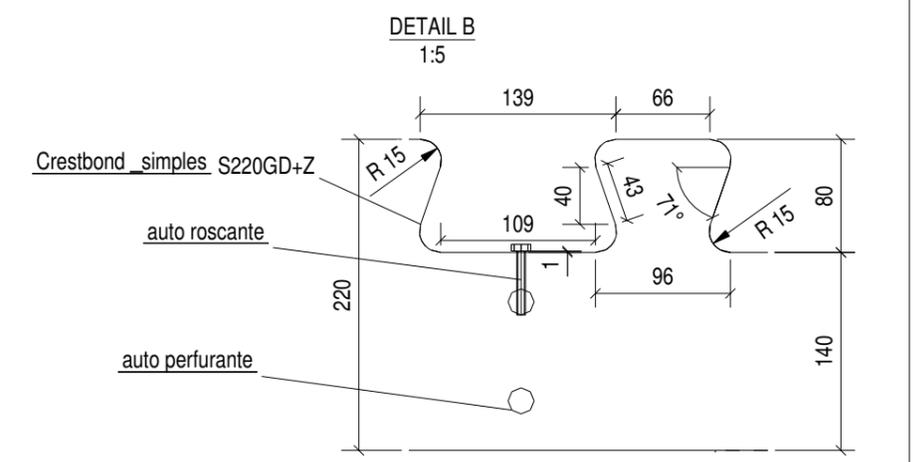
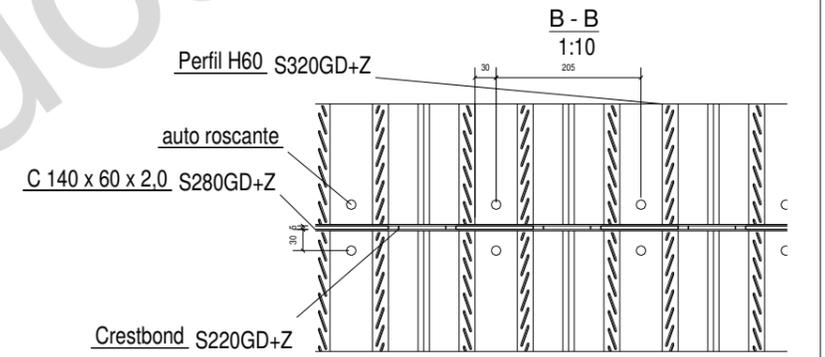
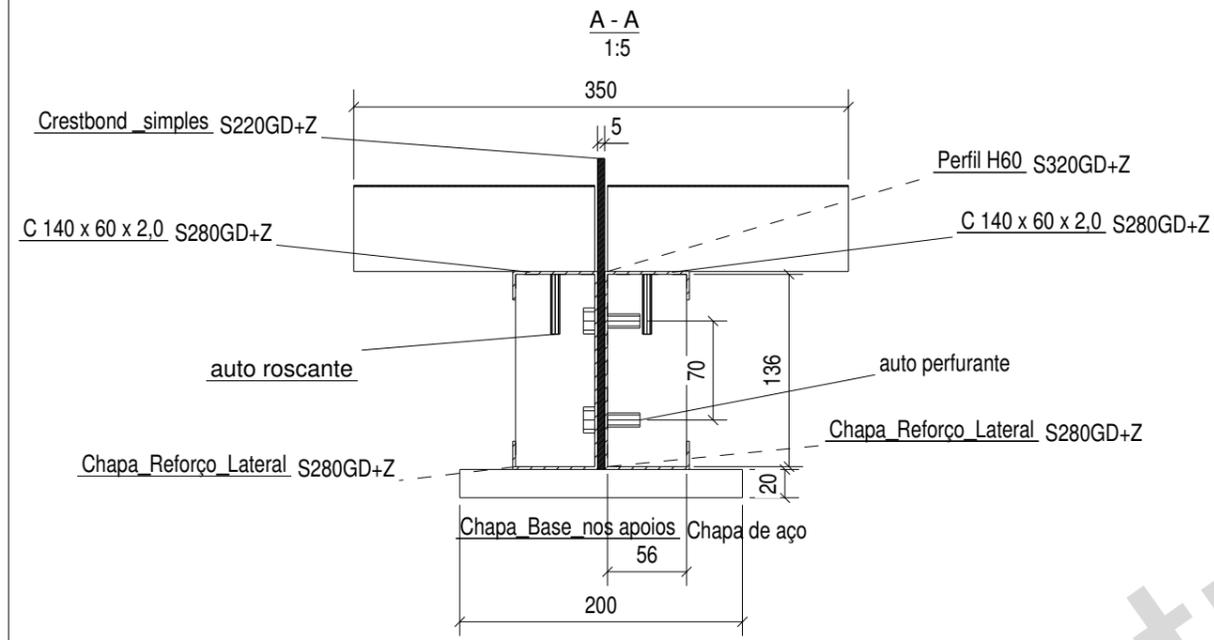
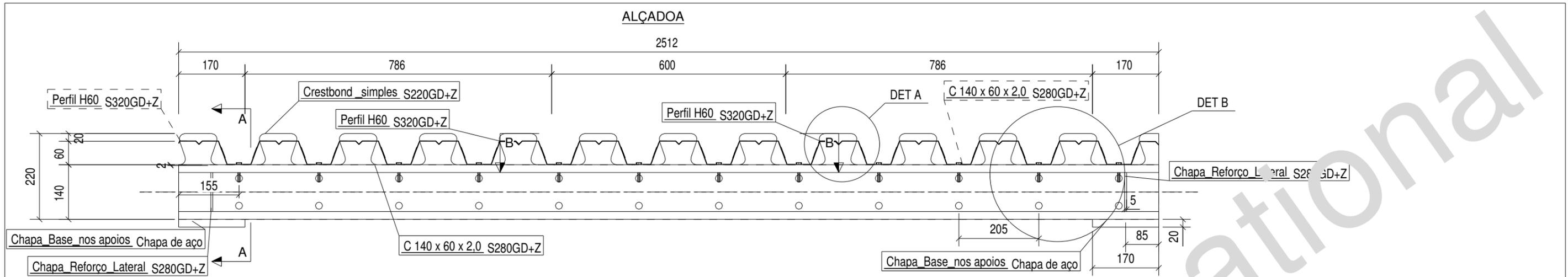
ALÇADOA

2512



espessura do conector xadrez = 6 mm (4 mm de chapa + 2mm de relevo)

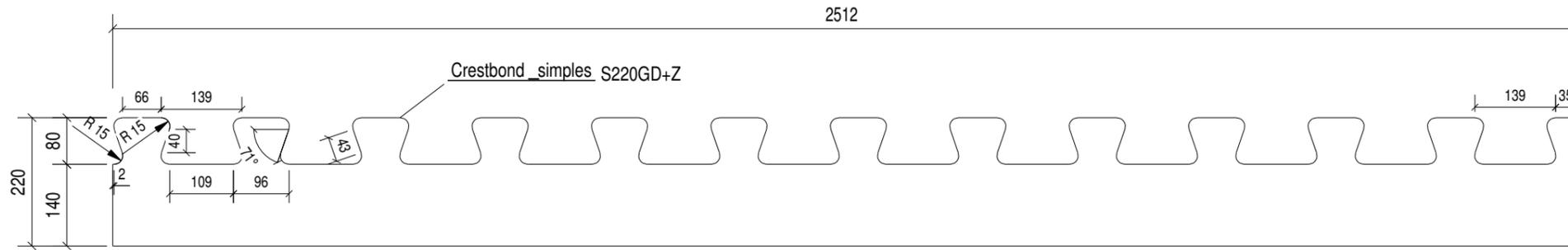
No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
Provete 1: Viga Mista, com conector de chapa nervurada Nº de exemplares: 2			POWERED BY  A TRIMBLE COMPANY		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER		ISSUE DATE			
PROJECT No.		1	SCALE		1:10
DRAWING No.		[4]	REVISION No.		0



No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
Provet 2: Viga Mista, com conector Crestbond Nº de exemplares: 2					
DRAWING TITLE		Alçada da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER		ISSUE DATE			
PROJECT No.	1	SCALE 1:2	1:5	1:10	
DRAWING No.	[3]	REVISION No.	0		

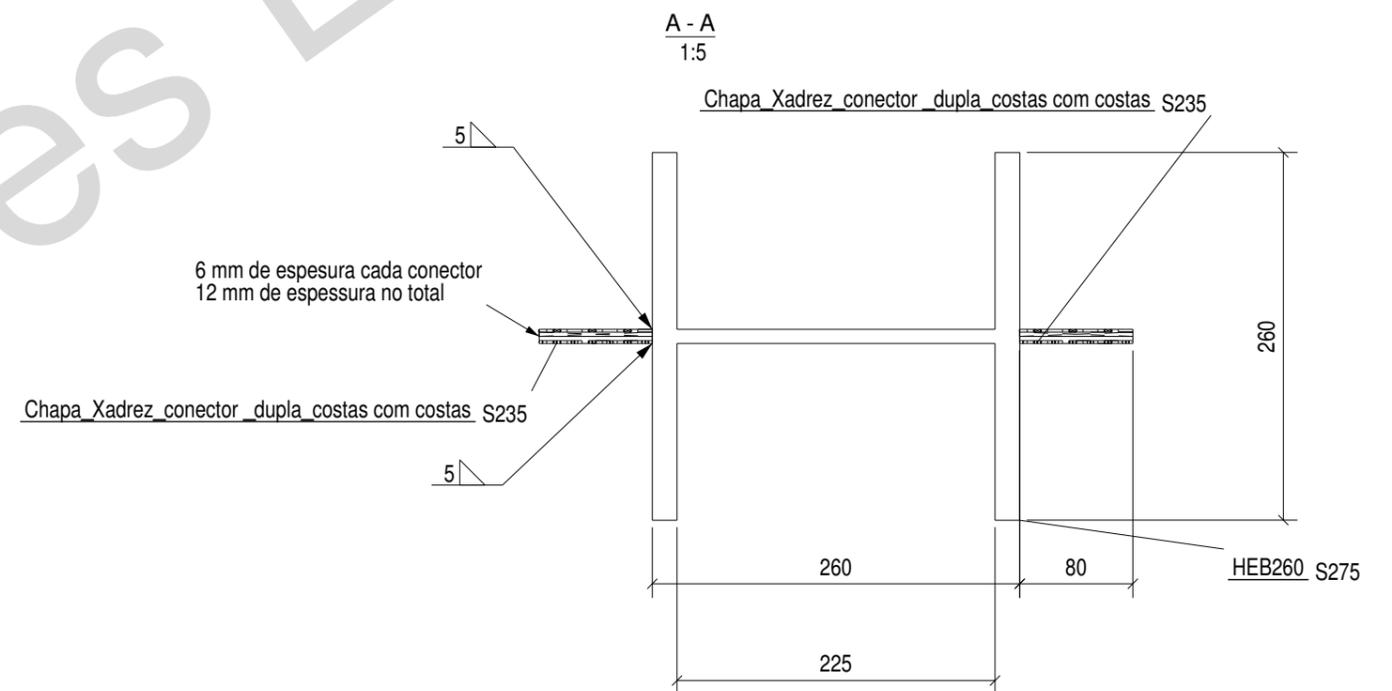
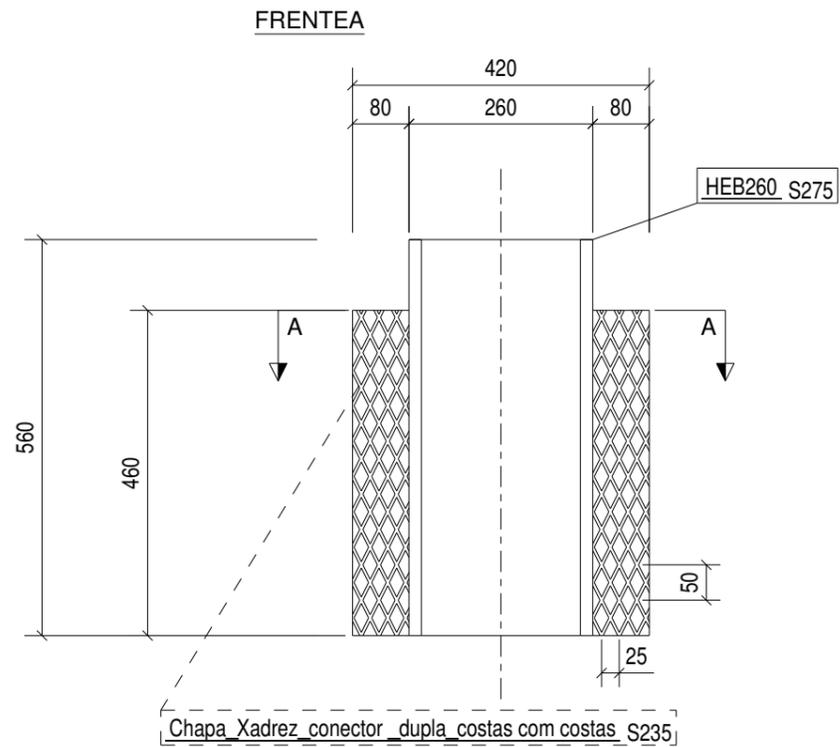


ALÇADOA



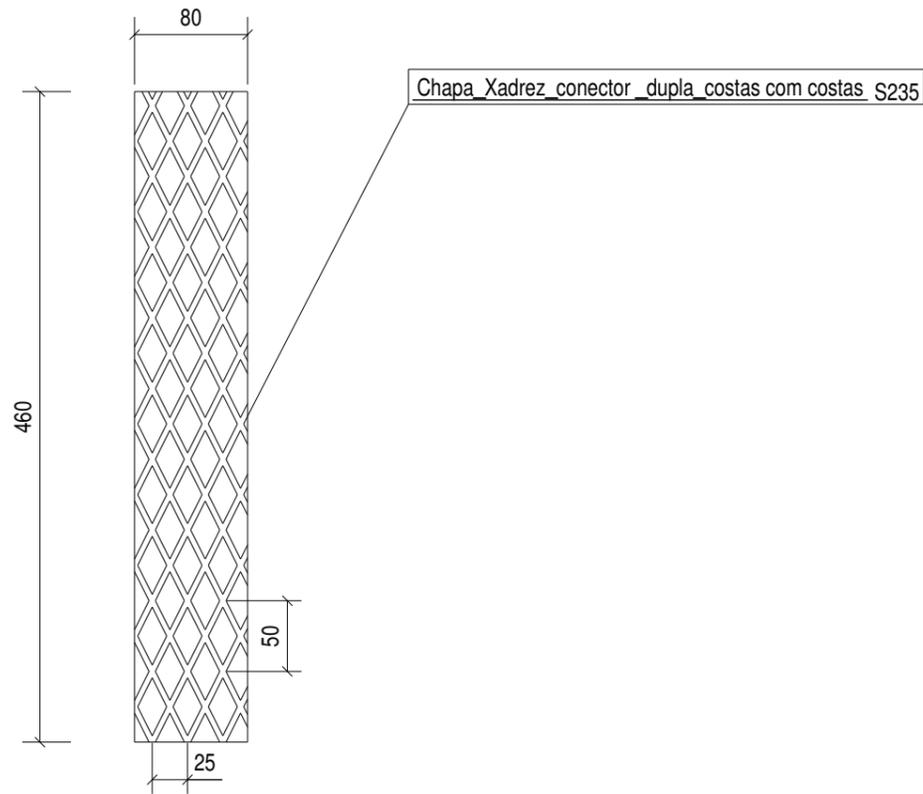
espessura do conector crestbond = 5 mm

No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
Provete 2: Viga Mista, com conector Crestbond Nº de exemplares: 2			POWERED BY  A TRIMBLE COMPANY		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER		ISSUE DATE			
PROJECT No.		1		SCALE 1:10	
DRAWING No.		[4]		REVISION No. 0	



No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Provete 3: Push-out, com conector de chapa nervurada Nº de exemplares: 3 </div>			POWERED BY  A TRIMBLE COMPANY		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER		ISSUE DATE			
PROJECT No.	1	SCALE 1:5	1:10		
DRAWING No.	[4]	REVISION No.	0		

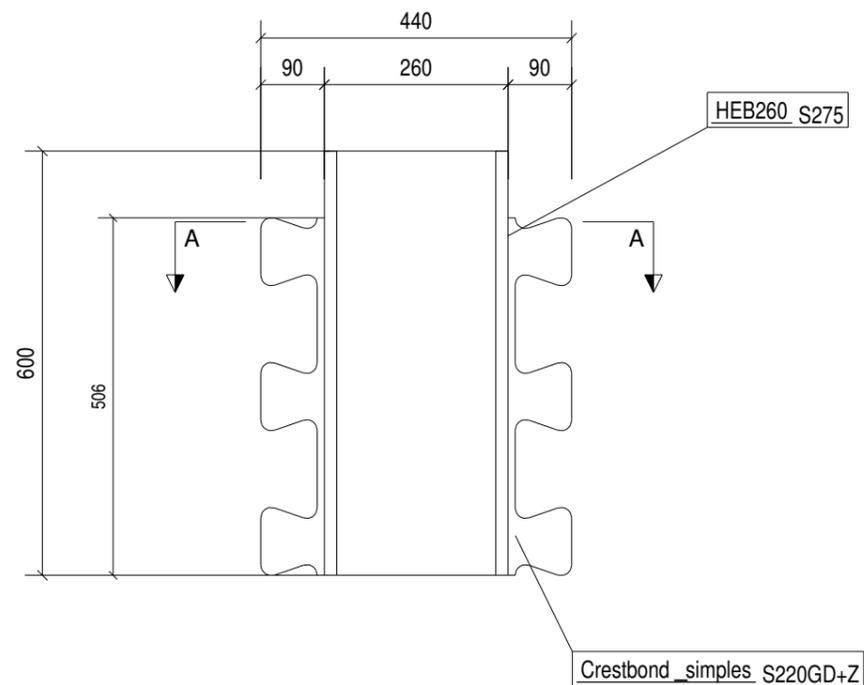
FRENTEA



espessura do conector xadrez = 6 mm (4 mm de chapa + 2 mm de relevo)

No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> Provete 3: Push-out, com conector de chapa nervurada N° de exemplares: 3 </div>			POWERED BY  A TRIMBLE COMPANY		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER				ISSUE DATE	
PROJECT No.		1		SCALE 1:5	
DRAWING No.		[5]		REVISION No. 0	

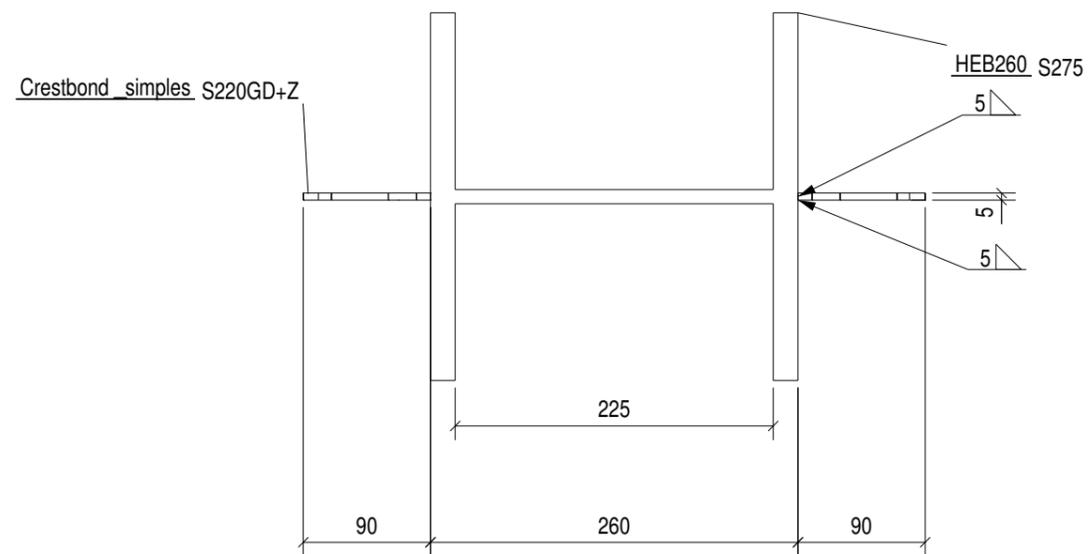
FRENTEA



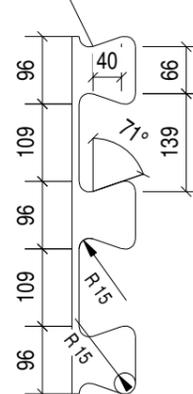
HEB260 S275

Crestbond_simples S220GD+Z

A - A
1:5

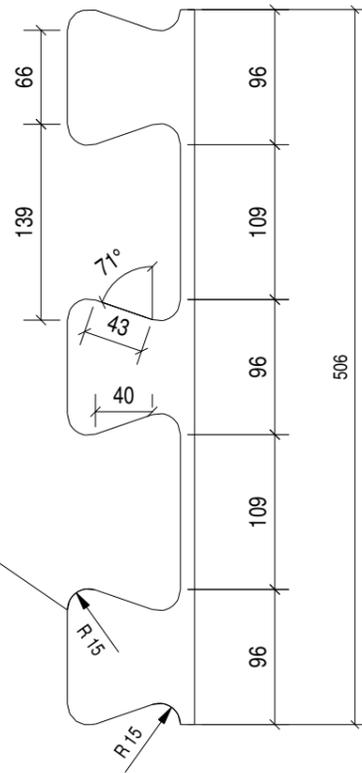


Crestbond_simples S220GD+Z



No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
		Provete 4: Push-out, com conector Crestbond Nº de exemplares: 3	<p>POWERED BY</p>  <p>A TRIMBLE COMPANY</p>		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER			ISSUE DATE		
PROJECT No.		1	SCALE 1:5	1:10	
DRAWING No.		[4]	REVISION No. 0		

FRENTEA



Crestbond_simples S220GD+Z

espessura do conector cretbond = 5 mm

No	REV MARK	REVISION DESCRIPTION	CREATED	APPROVED	REV. DATE
Provete 4: Push-out, com conector Crestbond N° de exemplares: 3			POWERED BY  A TRIMBLE COMPANY		
DRAWING TITLE		Alçado da Chapa			
PROJECT NAME		Tekla Corporation			
DESIGNER				ISSUE DATE	
PROJECT No.		1		SCALE 1:5	
DRAWING No.		[5]		REVISION No. 0	

Anexo VI

(Mapa de Quantidades para a Fabricação dos Provetes)

Tabela VI.1 - Mapa de Quantidades obtido a partir do *Software Tekla Structures*.

 Universidade do Minho, Guimarães Dissertação de Mestrado Email: a65143@alunos.uminho.pt							STATUS	
Project name:	Proвете 1: viga mista, S1	Project number:	1		Author:	Ana Neves		
Project address:	Universidade do Minho	List date:	13/04/2016		List number:	A65143		
Nome	Quantidade	Tipo de Material	Material	Volume (mm ³)		Peso (kg)		Quantidades de Provetes
				Unitário	Global	Unitário	Global	
Perfil H60	6	Aço	S320GD+Z	239980,0	1439880,0	0,03	0,18	2
C 140 x 60 x 2,0	2	Aço	S280GD+Z	1467066,4	2934132,8	11,05	22,11	
Chapa_Base_nos apoios	2	Aço	S235	680000,0	1360000,0	5,34	10,68	
Chapa_Reforço_Lateral	4	Aço	S235	38080,0	152320,0	0,30	1,20	
Chapa_Xadrez_conector	2	Aço	S235	3315972,0	6631944,0	18,70	37,39	
Parafuso auto roscante	24	Aço						
Parafuso auto perfurante	24	Aço						
TOTAL	64			5741098,4	12518277	35,42	71,56	

Tabela VI.1 - Mapa de Quantidades obtido a partir do *Software Tekla Structures*. (continuação)

 Universidade do Minho, Guimarães Dissertação de Mestrado Email: a65143@alunos.uminho.pt							STATUS	
Project name:	Proвете 2: viga mista, S2	Project number:	2		Author:	Ana Neves		
Project address:	Universidade do Minho	List date:	13/04/2016		List number:	A65143		
Nome	Quantidade	Tipo de Material	Material	Volume (mm ³)		Peso (kg)		Quantidades de Provetes
				Unitário	Global	Unitário	Global	
Perfil H60	6	Aço	S320GD+Z	242110	1452660	0,03	0,18	2
C 140 x 60 x 2,0	2	Aço	S280GD+Z	1467066,4	2934133	11,05	22,11	
Chapa_Base_nos apoios	2	Aço	S235	680000	1360000	5,34	10,68	
Chapa_Reforço_Lateral	4	Aço	S235	38080	152320	0,30	1,20	
Crestbond	1	Aço	S220GD+Z	2763310	2763310	21,69	21,69	
Parafuso auto roscante	24	Aço						
Parafuso auto perfurante	24	Aço						
TOTAL	63			5190566,4	8662423	38,41	55,85	

Tabela VI.1 - Mapa de Quantidades obtido a partir do *Software Tekla Structures*. (continuação)

 Universidade do Minho, Guimarães Dissertação de Mestrado Email: a65143@alunos.uminho.pt						STATUS			
Project name: Provete 3: push-out, S1		Project number: 3		Author: Ana Neves					
Project address: Universidade do Minho		List date: 13/04/2016		List number: A65143					
Nome	Quantidade	Tipo de Material	Material	Volume (mm ³)		Peso (kg)		Quantidades de Provetes	
				Unitário	Global	Unitário	Global		
HEB260	1	Aço	S275	6630400	6630400	52,08	52,08	3	
Chapa_Xadrez_conector	4	Aço	S235	220800	883200	1,28	5,14		
TOTAL	5			6851200	7513600	53,36	57,22		
Project name: Provete 4: push-out, S2		Project number: 4		Author: Ana Neves					
Project address: Universidade do Minho		List date: 13/04/2016		List number: A65143					
Nome	Quantidade	Tipo de Material	Material	Volume (mm ³)		Peso (kg)		Quantidades de Provetes	
				Unitário	Global	Unitário	Global		
HEB260	1	Aço	S275	6630400	6630400	52,08	52,08	3	
Crestbond	2	Aço	S220GD+Z	227700	455400	1,79	3,57		
TOTAL	3			6858100	7085800	53,87	55,65		

