



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

Configurações Inovadoras de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Paulo Sérgio Ribeiro Freitas

Orientador

Rui António Duarte Simões

Sandra Filomena Silva Jordão Alves

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

A elaboração do presente trabalho não teria sido possível sem o contributo de um conjunto de pessoas a quem aproveito para deixar algumas palavras sinceras de gratidão.

Ao Professor Doutor Rui António Duarte Simões e Professora Doutora Sandra Filomena Silva Jordão Alves pela excelente orientação, disponibilidade, apoio e amizade que sempre demonstraram.

Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional e incentivo que sempre prestaram ao longo do meu percurso académico.

Ao Eng.º Miguel Serra e ao Eng.º Hugo Augusto pela disponibilidade e partilha de saber essencial para a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos pelo apoio, amizade e confiança que sempre depositaram em mim.

RESUMO

Na concepção de estruturas metálicas é fundamental compreender e avaliar a influência das ligações no comportamento global da estrutura, pois são estas que possibilitam a transferência de esforços entre os diversos elementos estruturais.

Dada a crescente utilização de perfis tubulares ocos em estruturas de Engenharia Civil, torna-se imperativo o desenvolvimento de tipologias de ligações aparafusadas adequadas a este tipo de estruturas e à sua execução em obra. Em estruturas de grande porte, a necessidade de dividir os elementos principais em módulos de dimensão adequada ao transporte, justifica a adoção de ligações de emenda. Sendo este tipo de ligação executada em obra, é preferível adoptar uma ligação aparafusada relativamente à ligação soldada, para a qual é mais difícil garantir uma boa qualidade de execução.

Com o presente trabalho pretende-se desenvolver configurações inovadoras para a execução de ligações de emenda entre dois perfis tubulares por aparafusamento sem necessidade de recorrer a soldadura em obra. São considerados dois tipos de perfis: perfis tubulares de secção circular (CHS) e perfis tubulares de secção quadrangular (SHS), e dois tipos de parafusos: parafusos de cabeça de tremeço e parafusos de cabeça de embeber.

A caracterização do comportamento das ligações é realizada através de modelos de elementos finitos calibrados com resultados de ensaios experimentais já realizados no âmbito da presente investigação.

Por fim, confrontam-se os valores da resistência da ligação obtidos através dos modelos de elementos finitos com os valores da resistência da ligação calculados pelas formulações presentes no Eurocódigo 3, Parte 1-8, para ligações ao corte convencionais.

ABSTRACT

For the design of steel structures is essential to understand and evaluate the influence of the connections in the global behavior of the structure because they assure the transmission of internal forces between the structural elements.

In the presence of the increasing use of tubular hollow sections in Civil Engineering, it becomes imperative to develop typologies of bolted connections suitable for this type of structures and their implementation on site. In large structures, the need to divide the major elements in modules of appropriate size to transport, justifies the adoption of splice connections. Since this type of connection is performed in the construction site, it is preferable to adopt a bolted connection rather than a welded connection, for which it is more difficult to ensure a good quality of accomplishment.

The present work aims to develop innovative configurations for the execution of splice bolted connections between two tubular sections without the need of welding on site. Two types of sections are considered: circular hollow sections (CHS) and square hollow sections (SHS), and two types of screws: socket button head screws and countersunk head screws.

The characterization of the behavior of the connections is performed through finite element models calibrated with results of experimental tests that have been done in the ambit of the present investigation.

Finally, strength values achieved by the finite element models are compared with the strength values given by the formulations present in Eurocode 3, Section 1-8, for conventional shear connections.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Perfis tubulares circulares	3
1.3 Objectivo do trabalho.....	4
1.4 Estruturação da tese	6
2. ESTADO DE ARTE.....	7
2.1 Evolução Histórica.....	7
2.2 Documentos normativos e investigação em estruturas tubulares	8
2.3 Soluções de Emenda em Estruturas Tubulares	16
2.3.1 Ligação com chapas de topo	16
2.3.2 Ligação com chapas laterais.....	17
2.3.3 Ligações disfarçadas	18
3. ESTUDO DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3	20
3.1 Introdução	20
3.2 Comportamento de uma Ligação Aparafusada ao Corte	20
3.3 Formulação Proposta pela Parte 1-8 do Eurocódigo 3 para Ligações Convencionais ao Corte.....	21
4. AVALIAÇÃO NUMÉRICA	24
4.1 Introdução	24
4.2 Descrição da Modelo Numérico	24
4.2.1 Programa de elementos finitos utilizado	24
4.2.2 Geometria.....	27
4.2.3 Condições de apoio e de carregamento	32
4.2.5 Material	33
4.3 Calibração do Modelo Numérico.....	35
4.3.1 Descrição do ensaio experimental.....	35

4.3.2 Estudo de convergência da malha	37
4.3.3 Outros parâmetros	38
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	42
5.1 Ligações com Perfis CHS	42
5.2 Ligações com Perfis SHS.....	47
5.3 Análise Comparativa com Resultados Teóricos	52
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	55
6.1 Conclusões	55
6.2 Desenvolvimentos Futuros	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXOS	60
A – Cálculo das ligações pelas formulações do EC3.....	60
A.1 – Exemplo de cálculo da resistência de uma ligação com parafusos de cabeça de tremoço (Ligação 1)	60
A.1.1 – Cálculo da resistência do perfil exterior	60
A.1.2 – Cálculo da resistência do perfil interior	62
A.1.3 – Cálculo da resistência dos parafusos	63
A.2 – Exemplo de cálculo da resistência de uma ligação com parafusos de cabeça de embeber (Ligação 3).....	63
A.2.1 – Cálculo da resistência do perfil exterior.....	63
A.2.2 – Cálculo da resistência do perfil interior	65
A.2.3 – Cálculo da resistência dos parafusos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Produção e venda de elementos tubulares estruturais (Tata Steel, 2013)	2
Figura 1.2 – Ponte de Antrenas (Abelard, 2013).....	4
Figura 1.3 – Ligação em estudo.....	5
Figura 2.1 – Iron Bridge (English Heritage, 2013).....	7
Figura 2.2 – Eads Bridge (Built St. Louis, 2013)	8
Figura 2.3 – Estudo de emendas por pregagem (Packer e Lecce, 2003).....	10
Figura 2.4 – Modelo de elementos finitos para junta aparafusada (Kim <i>et al</i> , 2007)	11
Figura 2.5 – Modelos numérico e experimental estudados (Williams <i>et al</i> , 2009).....	12
Figura 2.6 – Esquema do modelo a ensaiar (Dusicka e Lewis, 2009).....	12
Figura 2.7 – Porção da ligação a ser estudada (Dias, 2011).....	13
Figura 2.8 – Modelo estudado (Dias, 2011)	13
Figura 2.9 – Interior da ligação (Soares, 2012)	14
Figura 2.10 – Seccionamento do tubo interior (Carvalho, 2012)	15
Figura 2.11 – Tipologia de parafusos para ensaio (Carvalho, 2012).....	15
Figura 2.12 – Exemplo de ligação com chapa de topo (Resende, 2008).....	16
Figura 2.13 – Modos de rotura da ligação (Wardenier <i>et al</i> , 2010)	17
Figura 2.14 – Esquema da ligação com chapas laterais (Wardenier <i>et al</i> , 2010).....	17
Figura 2.15 – Esquema de ligação com chapas interiores soldadas (Wardenier <i>et al</i> , 2010)...	18
Figura 2.16 – Esquema de ligação com parafusos interiores acessíveis a partir do exterior (Dutta <i>et al</i> , 1998).....	19
Figura 3.1 - Modo de funcionamento de uma ligação convencional ao corte (Carvalho, 2012)	21
Figura 3.2 - Espaçamentos mínimos entre parafusos (Eurocódigo 3 Parte 1-8, 2010)	21
Figura 3.3 - Área útil de uma secção transversal (Anet).....	22
Figura 4.1 – Famílias de elementos finitos.....	25
Figura 4.2 - Exemplo de classificação de elementos pelo número de nós	26
Figura 4.3 - Pontos de integração de um elemento bidimensional.....	26
Figura 4.4 - Perfil circular (CHS125x5) com parafuso cabeça de treçoço M12.....	28
Figura 4.5 - Perfil circular (CHS125x5) com parafuso cabeça de embeber M16	29
Figura 4.6 - Perfil quadrangular (SHS100x5) com parafuso cabeça de treçoço M12	29
Figura 4.7 - Perfil quadrangular (SHS100x5) com parafuso cabeça de embeber M16.....	30
Figura 4.8 - Perfil circular (CHS200x8) com parafuso cabeça de embeber M20	31
Figura 4.9 - Perfil quadrangular (SHS160x8) com parafuso cabeça de embeber M20.....	32
Figura 4.10 – Modelo representativo da ligação número 1	32

Figura 4.11 – Condições de apoio na direcção z	33
Figura 4.12 - Curva do aço dos perfis (valores de engenharia).....	34
Figura 4.13 – Curva do aço dos parafusos (valores nominais).....	34
Figura 4.14 – Decomposição da deformação total nas componentes elástica e plástica.....	35
Figura 4.15 – Posição dos transdutores de deslocamento	36
Figura 4.16 – Relação força-deslocamento da ligação 1 (parafusos M12 cabeça de tremoço).....	36
Figura 4.17 – Modo de rotura observado experimentalmente.....	37
Figura 4.18 - Discretização usada no modelo da ligação 1	38
Figura 4.19 – Diâmetro dos furos do perfil exterior a alterar.....	39
Figura 4.20 – Curvas força deslocamento obtidas (B1 e B2 correspondem às curvas do ensaio 1 e 2, respectivamente)	40
Figura 4.21 – Curvas força-deslocamento obtidas após definir o coeficiente de atrito.....	40
Figura 4.22 – Calibração do modelo numérico	41
Figura 5.1 – Curvas força-deslocamento das ligações 1 e 2.....	42
Figura 5.2 – Tensões equivalentes de Von Mises na ligação 1.....	43
Figura 5.3 – Tensões equivalentes de Von Mises na rotura (ligação 2)	44
Figura 5.4 – Curvas força-deslocamento das ligações 3 e 4.....	44
Figura 5.5 – Plastificação do perfil exterior, ligação 4.....	45
Figura 5.6 – Tensões equivalentes de Von Mises na rotura (ligação 3 e 4).....	45
Figura 5.7 – Curvas força-deslocamento das ligações 2 e 3.....	46
Figura 5.8 – Curvas força-deslocamento das ligações 5 e 6.....	46
Figura 5.9 - Tensões equivalentes de Von Mises na rotura (ligação 5 e 6)	47
Figura 5.10 - Relação força-deslocamento das ligações com perfis CHS.....	47
Figura 5.11 – Curvas força-deslocamento das ligações 7 e 8.....	48
Figura 5.12 – Evolução das tensões equivalentes de Von Mises nas ligações 7 e 8	49
Figura 5.13 – Curvas força-deslocamento das ligações 9 e 10.....	50
Figura 5.14 - Tensões equivalentes de Von Mises na rotura	50
Figura 5.15 - Curvas força-deslocamento das ligações 11 e 12	51
Figura 5.16 - Tensões equivalentes de Von Mises na rotura	51
Figura 5.17 - Relação força-deslocamento das ligações com perfis SHS	52

SIMBOLOGIA

Letras minúsculas latinas

d	Diâmetro nominal de um parafuso
d_0	Diâmetro de um furo
e_1	Distância do centro do furo à extremidade de uma placa, na direcção do esforço
e_2	Distância do centro do furo à extremidade de uma placa, na direcção perpendicular ao esforço
f_u	Tensão de rotura da chapa/perfil de aço
f_{ub}	Tensão de rotura à tracção de um parafuso
f_y	Tensão de cedência da chapa/perfil de aço
k_1	Factor de redução definido pelo EC3 – 1.8 Quadro 3.4
k_2	Factor de redução definido pelo EC3 – 1.8 Quadro 3.4
n	Número total de parafusos usados na ligação; número de furos ao longo da secção
p_1	Distância entre eixos dos parafusos na direcção do esforço
p_2	Distância entre fiadas adjacentes de parafusos, na direcção perpendicular ao esforço
t	Espessura

Letras maiúsculas latinas

A	Área total da secção transversal bruta de um elemento
A_{net}	Área útil de uma secção
A_s	Área útil de um parafuso, medida na zona roscada
E	Módulo de Elasticidade
$F_{b,Rd}$	Valor de cálculo da resistência da chapa/perfil ao esmagamento
$F_{v,Rd}$	Valor de cálculo da resistência dos parafusos ao corte
$N_{pl,Rd}$	Valor de cálculo da resistência plástica da secção total
$N_{t,Rd}$	Valor de cálculo da resistência da chapa/perfil à tracção
$N_{u,Rd}$	Valor de cálculo da resistência última da secção útil

Letras minúsculas gregas

α_b	Factor de redução definido pelo EC3 – 1.8, Quadro 3.4
α_v	Factor de redução definido pelo EC3 – 1.8, Quadro 3.4

γ_{Mi}	Coeficiente parcial de segurança
ε	Extensão
σ	Tensão

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Ao longo das últimas décadas o aço tem sido um grande aliado na construção civil. As suas características físicas, químicas e mecânicas fazem deste um material-chave capaz de oferecer uma variedade de novas possibilidades, tal como a capacidade da pré-fabricação e montagem em obra de estruturas complexas e uma significativa rapidez de fabrico e montagem. Além disso, graças às suas características naturais e potencial reciclagem, o aço tem um papel preponderante na sustentabilidade das construções. Todos estes factores fazem com que as estruturas metálicas estejam associadas ao conceito de soluções inovadoras e visionárias, expressado por diversas obras de arquitectura marcantes.

Num projecto, a escolha do perfil a utilizar é consequência de um processo interactivo entre diversos factores, tais como as vantagens e desvantagens e no que diz respeito às propriedades mecânicas, custos unitários do material, custos de fabrico, custos de montagem, custos de manutenção e requisitos arquitectónicos.

Os elementos tubulares têm um comportamento estrutural privilegiado, designadamente quando sujeitos a compressão, torção e flexão. As excelentes propriedades destes elementos combinadas à sua forma atractiva numa óptica arquitectónica, faz com que estes tenham vindo a ganhar espaço no sector da construção metálica ao longo dos últimos anos, como se pode constatar pela Figura 1.1.

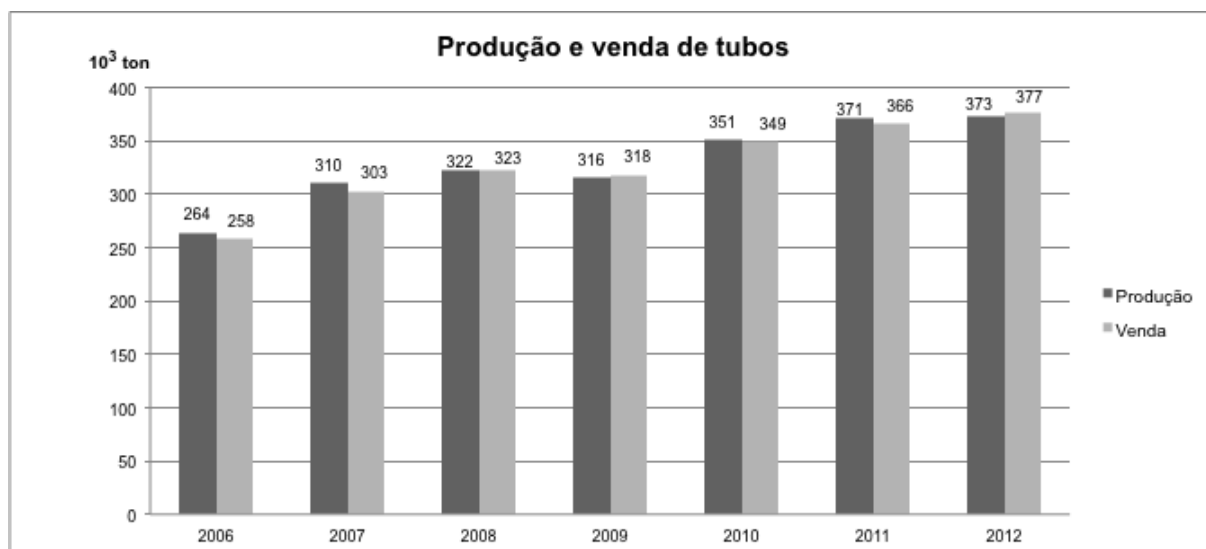


Figura 1.1 – Produção e venda de elementos tubulares estruturais (Tata Steel, 2013)

De seguida são apresentadas algumas vantagens da utilização de perfis tubulares como elementos estruturais na construção:

- Possibilitam a optimização das estruturas ao nível do peso, da resistência e da rigidez, bastando, para tal, variar a espessura da parede do tubo, evitando a necessidade de alterar as dimensões externas da secção ou a geometria da estrutura;
- apresentam coeficientes aerodinâmicos muito inferiores quando comparados com secções abertas;
- apresentam vantagens no que respeita à protecção contra a corrosão, pois possuem arestas arredondadas ou, no caso das secções circulares, ausência de arestas, o que garante uma melhor uniformização na aplicação da camada de protecção, quando comparados com secções abertas;
- podem ser reforçados através do preenchimento do seu interior com betão, o que lhes confere um acréscimo de resistência, particularmente, à compressão e contra incêndio;
- possibilitam a incorporação de instalações técnicas no seu interior;
- apresentam um excelente desempenho quando sujeitos à compressão, tracção e torção;
- comparando com elementos de secções abertas, é possível obter soluções estruturais mais leves pois os perfis tubulares não estão sujeitos a encurvadura lateral, o que resulta na economia de material.

A utilização de perfis tubulares também apresenta, contudo, algumas desvantagens, entre elas (Soares, 2011):

- O custo de fabrico deste perfil é um pouco mais elevado quando comparado com o custo de fabrico de secções abertas, aproximadamente 10% mais caro, a preços actuais;
- devido à sua geometria, denota-se alguma dificuldade na concepção das ligações que aliem a questão estética a um bom comportamento estrutural, visto não ser possível aceder ao interior dos elementos ligados;
- quando aplicado em vigas, em que o esforço predominante é a flexão, existe uma elevada quantidade de material que não contribui significativamente para a resistência do elemento, constituindo, desta forma, um desperdício de material considerável (rapidamente esta desvantagem passa a vantagem nos casos em que se verifica o problema da encurvadura lateral, que não existe neste tipo de perfil, contrariamente ao que acontece nos perfis com secção aberta).

Este tipo de estruturas apresenta na sua constituição algumas singularidades, das quais se destacam as ligações, que, quando não dimensionadas cuidadosamente, podem levar à ruína completa ou parcial da estrutura. A gradual banalização do uso de elementos tubulares conduz frequentemente a ligações mais complexas e com custos mais elevados visto que, como já foi referido, não é possível o acesso ao interior dos elementos conectados.

1.2 Perfis tubulares circulares

De todos os perfis tubulares existentes, o perfil circular é o que mais se destaca, apresentando-se como a melhor solução do ponto de vista estrutural. O seu excelente desempenho pode ser observado na natureza, em elementos tão distintos como os troncos e ramos de árvores ou na fascinante estrutura que é o esqueleto humano (Firmo, 2005). Na Figura 1.2 pode-se observar uma aplicação de perfis tubulares circulares numa estrutura da Engenharia Civil, onde as suas características estéticas são capazes de transmitir uma sensação de leveza.



Figura 1.2 – Ponte de Antrenas (Abelard, 2013)

Relativamente às vantagens já referidas para as estruturas em secções tubulares em geral, evidenciam-se algumas que são particulares de estruturas em secção tubular circular (Soares, 2011):

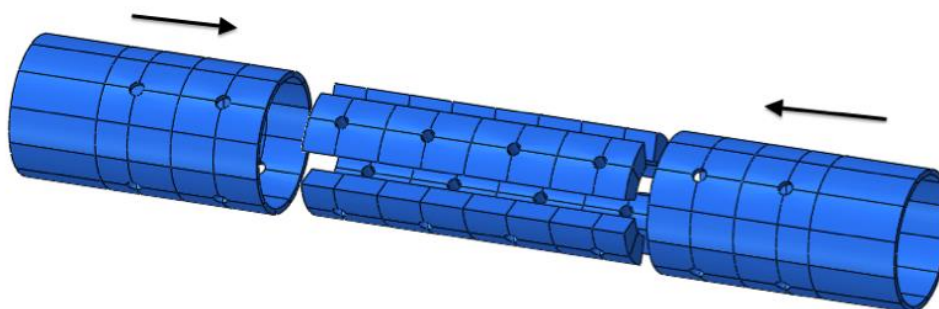
- Este tipo de perfil apresenta um menor perímetro para um maior conteúdo, otimizando a utilização deste material e tornando-o mais económico (Firmo, 2005);
- o facto de não ter arestas não só confere um melhor comportamento aerodinâmico, como também garante um menor impacto visual, originando assim soluções mais “limpas”, quando comparado com os seus pares tubulares (Firmo, 2005);
- caracteriza-se por apresentar a mesma resistência à flexão em torno de qualquer eixo de inércia, sendo assim a melhor secção a adoptar em estruturas nas quais os carregamentos podem variar de direcção ao longo da vida útil das mesmas.

1.3 Objectivo do trabalho

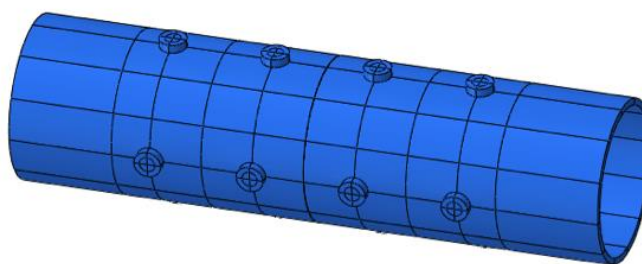
As ligações são elementos fundamentais e de grande sensibilidade por se tratarem de pontos de descontinuidade entre as barras, que desempenham um papel preponderante no comportamento das estruturas. Claramente, o principal papel de qualquer ligação estrutural é transferir os esforços de modo seguro através dos vários componentes da ligação. No entanto, na concepção de ligações, um entendimento claro do caminho de cargas, isto é, o mecanismo exacto através do qual os vários componentes da ligação transferem os esforços pela ligação, é essencial para uma avaliação clara da resistência de cada elemento da ligação (Narayanan, 1989).

Não obstante as vantagens das estruturas tubulares apresentadas anteriormente, aspectos associados às suas ligações têm constituído obstáculos à sua utilização, nomeadamente nas

ligações de emenda. A solução mais comum, com chapa de topo aparafusada, é muitas vezes preterida por questões estéticas e a solução soldada é evitada por questões económicas e técnicas. As ligações soldadas em obra apresentam uma série de requisitos, tais como, protecção contra vento e chuva, local apropriado e dificuldades no controlo da qualidade da solda. O presente trabalho enquadra-se nesta temática de optimização de ligações entre secções tubulares, na medida em que se pretende analisar numericamente ligações aparafusadas com várias tipologias de parafusos e tubo interior, que se revelam como soluções viáveis, pois associam a facilidade e economia de execução à questão estética. Esta solução difere das ligações convencionais sujeitas ao corte, pois devido à falta de acessibilidade ao interior do tubo, os parafusos são roscados no tubo interior e não em porcas como é habitual. Na Figura 1.3 é esquematicamente apresentada a tipologia das ligações estudadas.



a) Pormenor do encaixe



b) Vista pormenorizada da ligação

Figura 1.3 – Ligação em estudo

Esta dissertação surge no seguimento de três realizadas anteriormente, “Ligações em Estruturas Trianguladas com Perfis Tubulares de Secção Circular Oca” (Dias, 2011), “Análise de Ligações em Perfis Tubulares com Parafusos de Cabeça Embutida” (Soares, 2011) e “Avaliação Experimental de Configurações Inovadoras Para a Execução de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular” (Carvalho, 2012) . Com este trabalho pretende-se complementar a ligação estudada, efectuando alterações que pretendem

ultrapassar os problemas observados nos trabalhos anteriores. Enquanto as teses anteriores foram baseadas essencialmente em ensaios experimentais, a presente tese é exclusivamente numérica.

1.4 Estruturação da tese

A tese encontra-se organizada em seis capítulos principais, mais dois capítulos relativos a referências bibliográficas e anexos. Faz-se de seguida, uma breve descrição dos mesmos.

No **Capítulo 1 – Introdução**, é apresentada uma breve perspectiva histórica das estruturas metálicas em geral. Seguidamente são apresentadas as vantagens das estruturas metálicas tubulares, com especial destaque para os perfis tubulares circulares, especificando as suas características e pontos fortes. São definidos o objecto de estudo e o objectivo a alcançar e, por fim, procede-se a uma descrição sumária de cada capítulo inserido nesta tese.

No **Capítulo 2 – Estado de arte**, são referidos estudos desenvolvidos na área de ligações metálicas tubulares e a legislação em vigor em Portugal. São ainda descritas várias alternativas de emendas estruturais para elementos tubulares.

No **Capítulo 3 – Estudo da ligação segundo o Eurocódigo 3**, é descrito o modo de funcionamento da ligação em estudo e apresentada a formulação aplicável presente no Eurocódigo 3, parte 1-8.

No **Capítulo 4 - Avaliação numérica**, são apresentados os modelos numéricos das várias tipologias analisadas. Descrevem-se as suas características e é apresentada a calibração dos modelos recorrendo aos resultados experimentais obtidos por Carvalho, em 2012.

No **Capítulo 5 – Análise de resultados**, são avaliados os resultados obtidos e comparam-se os resultados das diferentes tipologias estudadas entre si e com os valores de resistência teóricos.

No **Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros**, são apresentadas as conclusões obtidas, assim como algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Evolução Histórica

Desde a mais antiga construção até à mais actual, as estruturas metálicas estiveram sempre conotadas a algo inovador, quer pelas formas assumidas, quer pela tecnologia envolvida na sua produção e construção, abrindo novos horizontes no que se refere à sua aplicabilidade dia-a-dia.

A evolução do processo de fundição do ferro em massa, impulsionada pelo trabalho de Abraham Darby, tem um papel importante no início da Revolução Industrial que culmina na construção da ponte “Iron Bridge” (Figura 2.1) executada por Abraham Darby III em 1779.



Figura 2.1 – Iron Bridge (English Heritage, 2013)

Na segunda metade do século XIX, com a inovação do processo de produção em massa do aço, por Henry Bessemer, a tecnologia dos materiais sofreu uma grande evolução. Durante o processo de Bessemer é injectado ar no ferro fundido para remover o carbono e outras impurezas, no que resulta um material mais forte e durável permitindo que estruturas maiores e mais duradouras fossem construídas, gerando um novo impulso na construção metálica, do qual se evidencia a primeira ponte construída em aço, a “Eads Bridge” concluída em 1874, apresentada na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Eads Bridge (Built St. Louis, 2013)

2.2 Documentos normativos e investigação em estruturas tubulares

A partir dos anos 50, ultrapassaram-se os problemas do ponto de vista da produção, tal como a preparação de topo e soldadura, abrindo o caminho para o sucesso das estruturas tubulares. O problema continuava a ser a determinação da resistência das ligações (Wardenier *et al*, 2010).

Em 1951, W. Jamm apresentou o primeiro conjunto de recomendações para o cálculo de ligações entre perfis tubulares circulares em estruturas treliçadas, sendo esta uma das primeiras tentativas de ultrapassar a escassez de estudos sobre o funcionamento de ligações entre perfis tubulares (Wardenier *et al*, 2010).

Com o aumento da procura deste tipo de soluções, particularmente em Inglaterra, continuaram a surgir diversos estudos experimentais e teóricos, dando origem, por volta de 1970, a um guia de recomendações de projecto melhorado. Após um ano, esse mesmo guia foi implementado no Canadá e publicado pela Stelco Inc, surgindo assim o primeiro manual de ligações para perfis tubulares com o nome “Hollow Structural Sections – Design manual for connections”. Ainda na mesma década surgiram outros guias e manuais, como por exemplo, o “Limit States Design Steel Manual” publicado pelo CISC – Canadian Institute of Steel Construction, no ano de 1977 (Resende, 2008).

Na década de 80, através da consolidação das pesquisas experimentais, ocorre um grande avanço no estudo de ligações entre perfis tubulares, surgindo diversos estudos, publicações e manuais, destacando-se os editados pela associação CIDECT – Comité International pour le

Développement et Étude de la Construction Tubulaire (Resende, 2008). O CIDECT, fundado em 1962, é uma associação internacional de produtores de estruturas tubulares, criada com o objectivo de expandir o conhecimento acerca das secções tubulares em aço e suas aplicações na construção metálica.

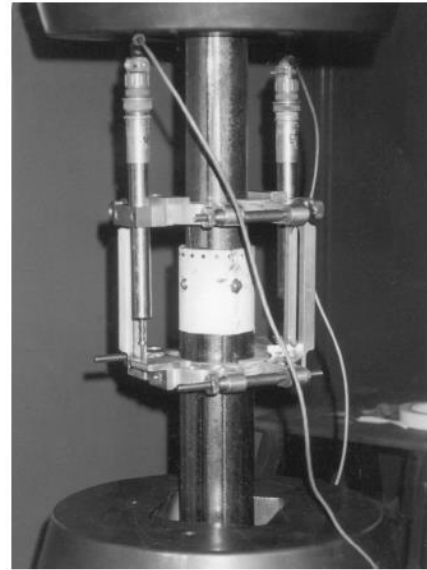
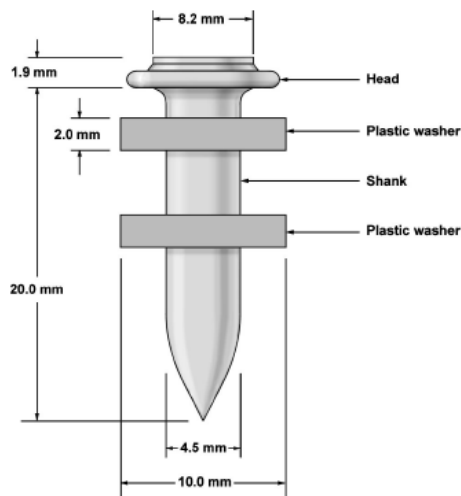
A investigação continuou na década de 90, com a principal preocupação de obter novas formulações mais simples e concisas. Através do desenvolvimento da tecnologia informática, começaram a surgir os primeiros estudos realizados com recurso a métodos numéricos, nomeadamente o método dos elementos finitos (Resende, 2008). Em 1992, foi publicado pelo CISC um manual mais completo sobre as estruturas metálicas tubulares e as suas ligações, denominado “Hollow Structural Section: Connection and Trusses – A Design Guide” (CISC, 2012).

No ano de 1975, a Comissão das Comunidades Europeias adopta um programa de acção na área da construção, cujo objectivo era a eliminação de entraves técnicos ao comércio de produtos e serviços, com vista à elaboração de um conjunto de regras técnicas harmonizadas para o projecto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil, que passaram a ser conhecidos por Eurocódigos Estruturais. Embora se possa dizer que a actividade nesta área continue por mais alguns anos, em 2007 foi publicada a última das 58 partes que constituem as dez Normas Europeias que compõem actualmente os Eurocódigos (LNEC, 2013).

Das dez normas referidas, a que diz respeito às estruturas em aço é o denominado Eurocódigo 3 (NP EN 1993: 2010 – Projecto de estruturas de aço). Para este trabalho é relevante a Parte 1.8 (NP EN 1993-1-1: 2010) que aborda o cálculo das ligações em estruturas metálicas.

Os estudos e pesquisas científicas realizados no âmbito das ligações entre perfis tubulares foram sempre muito direccionados no sentido das ligações soldadas, sendo escassos os estudos relativamente a ligações aparafusadas. No entanto, referenciam-se de seguida alguns estudos que contribuíram para a evolução das ligações de emenda em estruturas metálicas.

Em 2003, Packer e Lecce realizaram um estudo que teve como objecto de análise as emendas feitas por pregagem. Foram testados vários modelos sujeitos a ensaios estáticos e de fadiga, variando os parâmetros de resistência dos tubos, número de pregos por linha e a espessura dos tubos, tendo sido alvo de estudo os modos de rotura por corte e por esmagamento e tracção da chapa. Na Figura 2.3 é possível observar o tipo de prego utilizado, bem como a instalação experimental.



a) Tipologia do prego a ensaiar

b) Instalação para ensaio

Figura 2.3 – Estudo de emendas por pregagem (Packer e Lecce, 2003)

A resistência esperada e os modos de rotura deste tipo de ligação foram avaliados com base em estudos desenvolvidos anteriormente. O cálculo da resistência ao corte é obtido através da seguinte expressão:

$$V_u = (\textit{shear strength of nail}) \times n \quad (1)$$

sendo n o número de pregos.

A resistência ao esmagamento dos tubos e a resistência à tracção da parede do tubo são calculadas através das expressões (2) e (3), respectivamente.

$$B_u = 3 \times d \times t \times n \times F_u \quad (2)$$

$$T_u = A_{ne} \times F_u \quad (3)$$

sendo d o diâmetro dos pregos, t a espessura dos tubos, F_u a tensão de rotura do aço dos tubos e A_{ne} a área útil da secção transversal.

No que diz respeito aos ensaios estáticos, apenas três ligações tiveram modos de rotura diferentes do esperado, situação que poderá ter sido provocada por excentricidades existentes. Em todos os casos, a resistência observada foi ligeiramente superior à esperada, pelo que foi concluído que a resistência pode ser adequadamente estimada pelas equações anteriormente apresentadas. Através dos ensaios de fadiga foi concluído que uma ligação deste tipo deve ser

evitada quando é susceptível de flectir devido a carregamentos repetitivos, tendo sido propostas um conjunto de equações que têm em conta o fenómeno da fadiga.

Em 2007, Kim, Yoon e Kang procederam à análise e modelação de ligações aparafusadas por elementos finitos através do estudo de quatro modelos distintos: modelo de parafuso sólido, modelo de parafuso acoplado, modelo de parafuso aranha e modelo sem parafuso, como descritos na Figura 2.4. Através de uma análise estática e dinâmica, ficou concluído que o modelo de parafuso sólido é o que simula com maior precisão o comportamento físico da ligação, enquanto os outros modelos garantiam menor tempo de cálculo, mas com resultados de qualidade inferior (Kim *et al*, 2007).

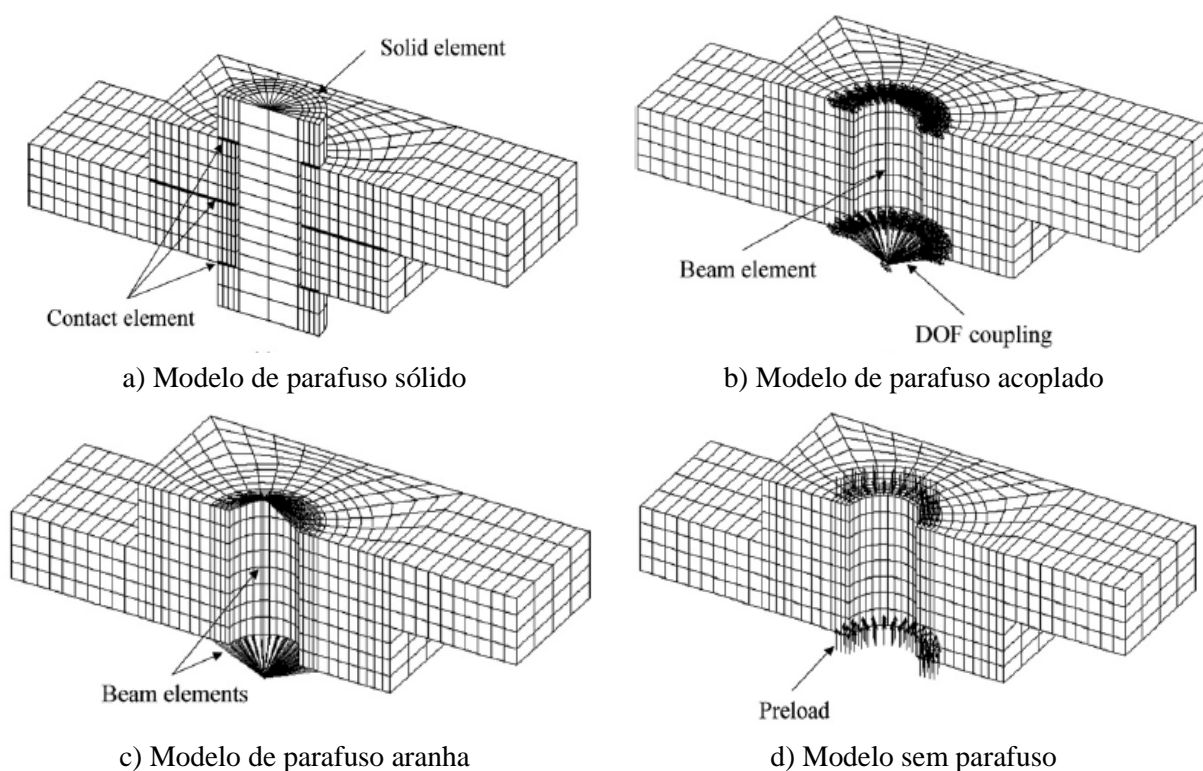
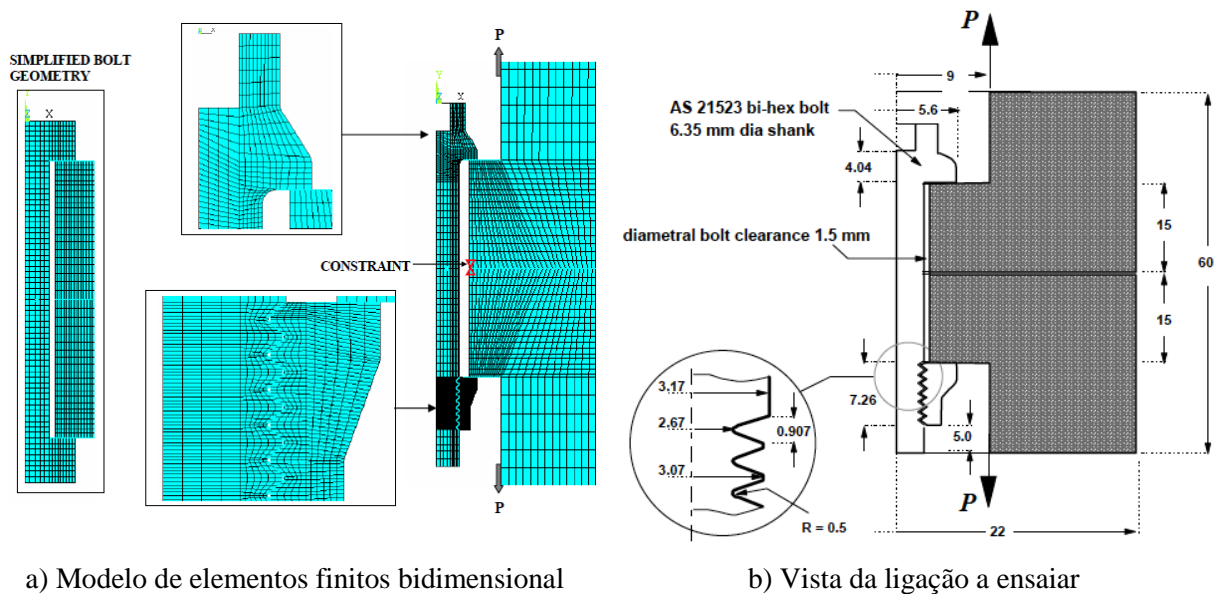


Figura 2.4 – Modelo de elementos finitos para junta aparafusada (Kim *et al*, 2007)

Em 2009, uma investigação levada a cabo por Williams *et al* (2009) visou a análise de ligações aparafusadas pré-tensionadas através da análise experimental da ligação em causa e de um modelo numérico de elementos finitos (Figura 2.5). As principais conclusões a extrair deste estudo são que os resultados experimentais e numéricos têm uma aproximação razoável e que os modelos de elementos finitos que não incluíam a parte roscada na sua geometria, e que usavam representações simplificadas da geometria da cabeça do parafuso e da porca, produziram resultados de acordo com os dados experimentais.



a) Modelo de elementos finitos bidimensional

b) Vista da ligação a ensaiar

Figura 2.5 – Modelos numérico e experimental estudados (Williams *et al*, 2009)

Também em 2009, Dusicka e Lewis, realizaram um estudo envolvendo parafusos de alta resistência pré-tensionados ao corte com placas de “enchimento”, analisando o comportamento da ligação devido à existência dessas placas, com variações nas propriedades do material e nas propriedades geométricas dos componentes da ligação. Foram comparados diversos factores ao longo dos ensaios realizados: a resistência da ligação, deformação sofrida e o valor da força de escorregamento entre placas. A conclusão mais relevante retirada deste estudo foi de que, aumentando a espessura das placas de enchimento, a resistência da ligação tendia a diminuir até um certo limite, a partir do qual recuperava, para placas mais espessas. Na Figura 2.6 está representado o modelo genérico estudado (Dusicka e Lewis, 2009).

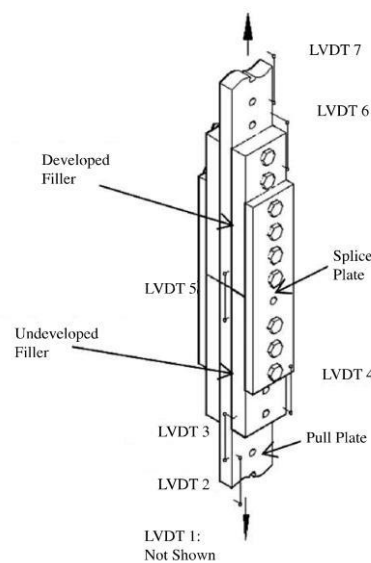


Figura 2.6 – Esquema do modelo a ensaiar (Dusicka e Lewis, 2009)

Em 2011, Dias efectuou o estudo de uma ligação aparafusada de emenda entre dois perfis tubulares de secção circular sujeita a esforço axial de compressão. O trabalho realizado consistiu na análise de uma porção da ligação de características representativas do comportamento da mesma, representada na Figura 2.7.

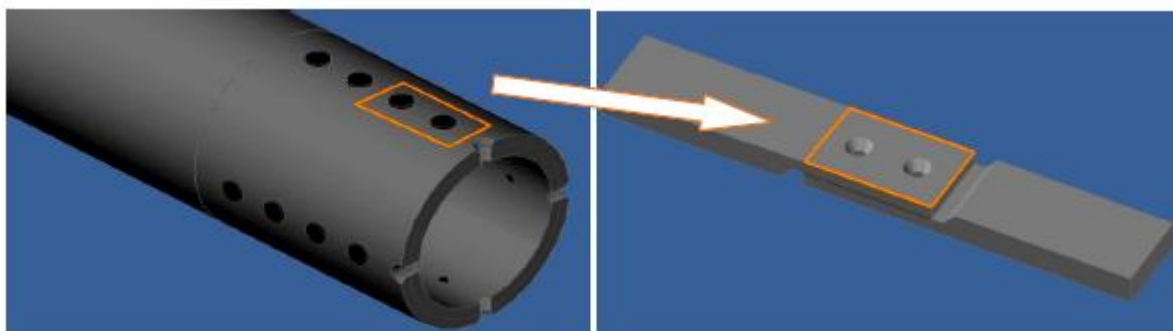
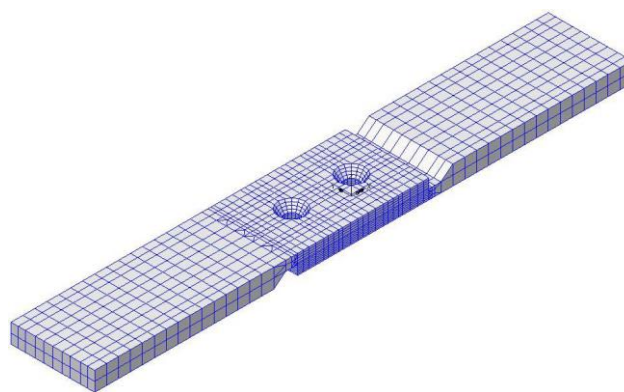


Figura 2.7 – Porção da ligação a ser estudada (Dias, 2011)

A caracterização do comportamento da ligação foi realizada através de um modelo de elementos finitos calibrado com resultados de ensaios experimentais. Na Figura 2.8 a) e b), estão representados, respectivamente, uma perspectiva do provete ensaiado e o modelo de elementos finitos analisado.



a) Perspectiva do provete



b) Modelo de elementos finitos analisado

Figura 2.8 – Modelo estudado (Dias, 2011)

Dias concluiu que a formulação dada pelo Eurocódigo 3 – 1.8 para o cálculo de ligações aparafusadas, em particular com o uso de parafusos de cabeça de embeber, não é esclarecedora e estima inferiormente a resistência da ligação estudada.

Em 2012, o trabalho realizado por Soares teve como objectivo a análise de ligações de emenda em elementos tubulares de secção circular, sujeitas a esforço axial de tracção, cuja ligação é materializada através do aparafusamento a um troço de perfil tubular de secção circular que se situa no interior da ligação, como mostra a Figura 2.9.



Figura 2.9 – Interior da ligação (Soares, 2012)

Foram analisados dois modelos: modelo com parafusos M8 de classe 8.8 e outro com parafusos M10 de classe 10.9, ambos de cabeça de embeber. Uma das principais conclusões é que o facto de o tubo interior da ligação possuir uma espessura próxima à do tubo exterior e da mesma ordem de grandeza da altura da cabeça dos parafusos, permite a rotação destes, o que faz com que a rigidez da ligação seja baixa.

Também em 2012, Carvalho executou um programa experimental com o objectivo de desenvolver configurações inovadoras para a execução de ligações de emenda de barras metálicas de secção circular que eliminassem, ou pelo menos reduzissem, os problemas observados no estudo realizado por Soares. Para tal, Carvalho propôs o aumento da espessura e seccionamento do tubo interior de maneira a restringir a rotação e a flexão no parafuso (Figura 2.10). A substituição do tubo interior por “placas” individuais permitiu um melhor ajuste entre o tubo e estas peças interiores



a) Processo de seccionamento do tubo interior



b) Montagem das peças do tubo interior

Figura 2.10 – Seccionamento do tubo interior (Carvalho, 2012)

A geometria da ligação e dos parafusos (8 parafusos M12 de classe 10.9) foi constante durante o estudo, fazendo variar apenas o tipo de parafusos, analisando as variações de comportamento provocadas pelos mesmos. Foram utilizados parafusos de cabeça de embeber, de cabeça de tremço e parafusos Holo-Bolt Flush-Fit (Figura 2.11).



a) Parafuso de cabeça de embeber



b) Parafuso de cabeça de tremço



c) Parafuso Holo-Bolt Flush-Fit agrupado



d) Parafuso Holo-Bolt Flush-Fit desagrupado

Figura 2.11 – Tipologia de parafusos para ensaio (Carvalho, 2012)

Carvalho concluiu que, na presença de parafusos de cabeça de embeber, a adopção de um tubo interior de maior espessura origina um ganho considerável na rigidez da ligação, ainda que se verifique uma ligeira rotação nos parafusos. Os parafusos Holo-Bolt Flush-Fit são uma alternativa pouco recomendável devido à baixa rigidez que conferem à ligação.

Relativamente aos parafusos de cabeça de tremoço, uma vez que estão impedidos de rodar, têm uma rotura de corte simples, tornando-se na melhor alternativa entre as testadas.

2.3 Soluções de Emenda em Estruturas Tubulares

2.3.1 Ligação com chapas de topo

Na necessidade de realizar ligações de emenda, a ligação com chapa de topo é a mais utilizada pois é relativamente fácil de executar e é uma tipologia bastante estudada, nomeadamente por Kato & Hirose (1984), Igarashi *et al.* (1985) e Cao & Parker (1998), existindo inclusive um guia de cálculo do CIDECT elaborado por Wardenier *et al.* (2008), baseado no trabalho de Igarashi *et al.* (1985). Na Figura 2.12 é apresentada um exemplo de uma ligação com chapa de topo.

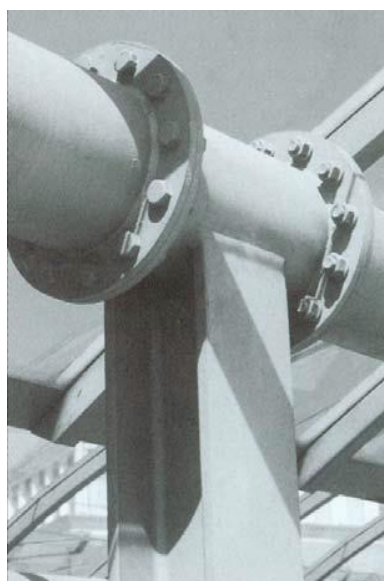


Figura 2.12 – Exemplo de ligação com chapa de topo (Resende, 2008)

Esta ligação é caracterizada pela aplicação de chapas soldadas nas extremidades dos perfis, com um diâmetro superior a estes, onde são aplicados os parafusos. A resistência deste tipo de ligação, sujeita a esforços axiais de tracção, é obtida pela tracção desenvolvida nos parafusos e pela resistência das placas ao punção e à flexão provocada pela força de alavanca. Trata-se, contudo, de uma ligação esteticamente pouco atractiva.

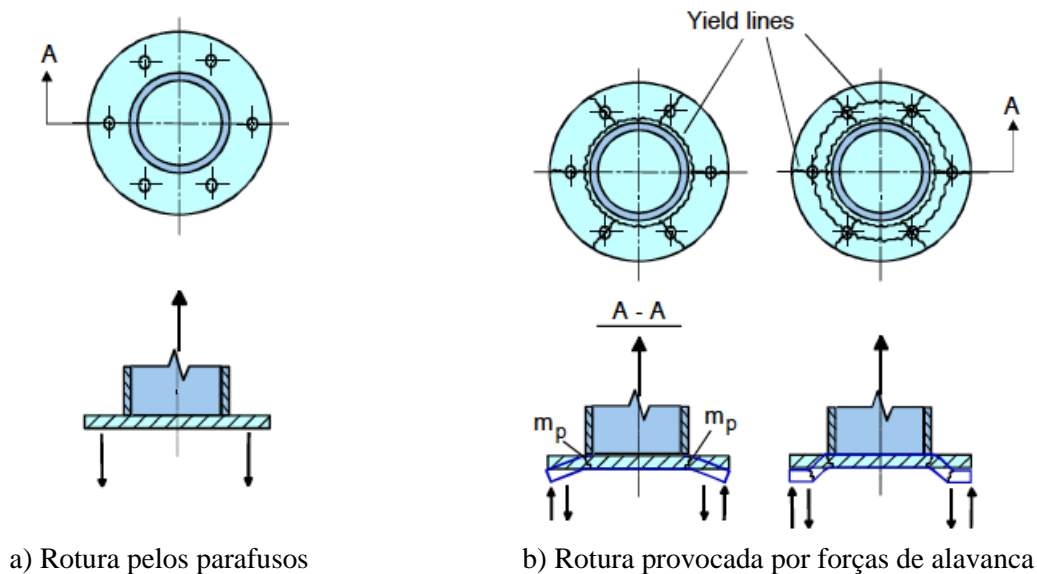


Figura 2.13 – Modos de rotura da ligação (Wardenier *et al*, 2010)

2.3.2 Ligação com chapas laterais

Este tipo de ligação, visível na Figura 2.14, é composta por chapas soldadas longitudinalmente ao longo dos tubos a ligar. A estas chapas, são aparafusadas umas outras chapas que garantem a transmissão de esforços entre os elementos a ligar (Wardenier *et al*, 2010). O princípio fundamental de funcionamento desta ligação é ao corte, onde os possíveis modos de rotura serão o corte nos parafusos, esmagamento das chapas, rotura por tracção nas chapas e rotura da soldadura.

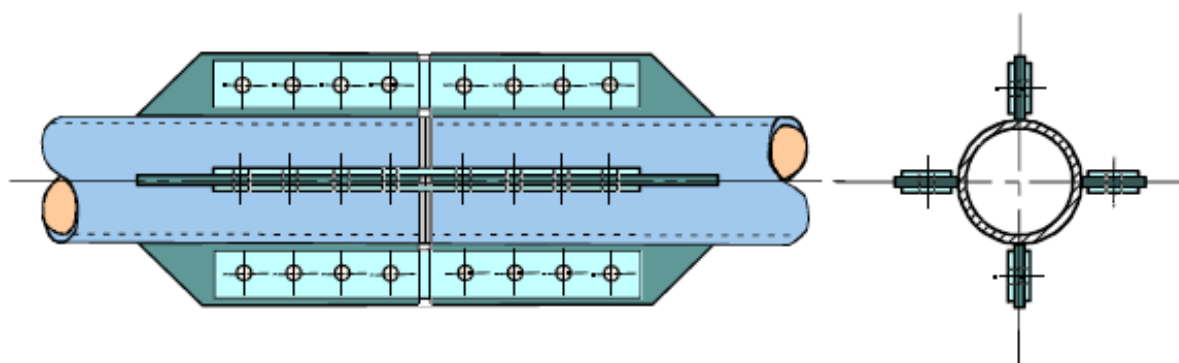


Figura 2.14 – Esquema da ligação com chapas laterais (Wardenier *et al*, 2010)

Este tipo de ligação tem uma reduzida aplicação em projecto, pois para além de envolver alguma complexidade, poderá contrariar os princípios de estética que se pretende. A aplicação

de uma ligação com esta tipologia requer especial atenção na prevenção da corrosão, visto haver a possibilidade de entrada de água nos tubos (Wardenier *et al*, 2010).

2.3.3 Ligações disfarçadas

Sendo a estética um factor condicionante quando se pretende realizar uma ligação de emenda entre perfis tubulares, várias tipologias foram sendo desenvolvidas de maneira a garantir uma continuidade das linhas características das estruturas metálicas tubulares.

Na Figura 2.15 é possível visualizar uma tipologia de ligação passível de ser adoptada, apresentada por Wardenier *et al* (2010). Consiste em soldar duas chapas, uma em cada tubo a ligar, prolongadas para além da extremidade onde são aplicados parafusos que irão funcionar ao corte. Posteriormente é colocado um troço de tubo, previamente preparado, que oculta a ligação.

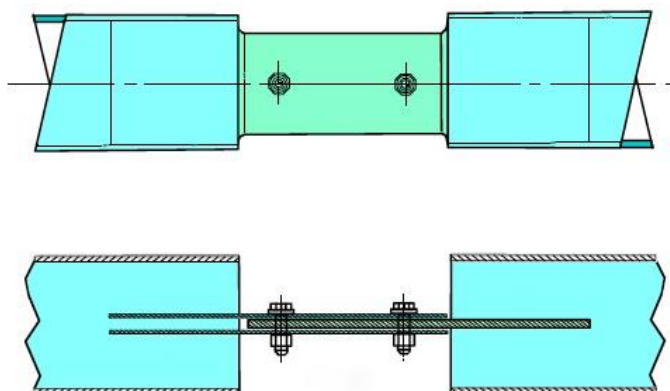


Figura 2.15 – Esquema de ligação com chapas interiores soldadas (Wardenier *et al*, 2010)

Uma outra tipologia possível é a apresentada por Dutta *et al* (1998), visível na Figura 2.16, onde é soldada uma chapa de tampão na extremidade de cada tubo e são aplicados parafusos que irão funcionar à tracção. De maneira a ser possível aparafusar os parafusos é necessário executar aberturas no tubo, que posteriormente serão tapadas. Este tipo de ligação requer uma especial atenção pois a resistência dos tubos é diminuída nas zonas onde se encontram as aberturas.

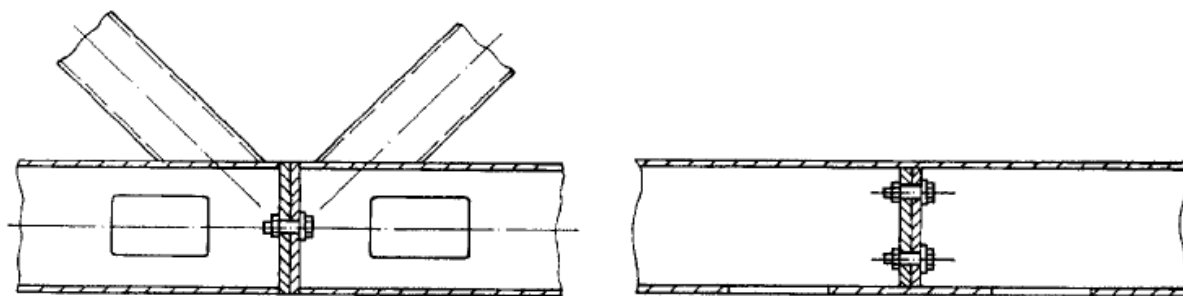


Figura 2.16 – Esquema de ligação com parafusos interiores acessíveis a partir do exterior (Dutta *et al*, 1998)

3. ESTUDO DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3

3.1 Introdução

No que se refere a ligações aparafusadas ao corte, o Eurocódigo 3, Parte 1-8, não faz a distinção entre a metodologia a aplicar a ligações entre chapas planas ou chapas curvas como acontece em ligações entre perfis tubulares ocos. Por conseguinte nesta tese utilizaram-se as metodologias aplicáveis a ligações ao corte convencionais, ainda que estejamos a tratar de ligações que tenham uma configuração geométrica algo diferente. É de referir também que as metodologias presentes no Eurocódigo 3 foram desenvolvidas e calibradas para ligações com parafusos com porca no lado oposto, o que não se verifica na ligação em estudo.

A transmissão de esforços na ligação em estudo ocorre essencialmente por corte nos parafusos. Com o aumento da carga de tracção, existe um consequente aumento das tensões de contacto entre os parafusos e o tubo que provocará um aumento do esforço de corte nos parafusos e, ao atingir a tensão de resistência ao corte dos mesmos, verifica-se a rotura da ligação. No entanto, pode acontecer que a resistência à tracção do tubo seja atingida primeiro, caso esta resistência seja inferior à resistência ao corte dos parafusos. Poderá então ocorrer rotura pelos parafusos ou pelo perfil e os modos de rotura possíveis serão coincidentes com os de uma ligação ao corte comum.

3.2 Comportamento de uma Ligação Aparafusada ao Corte

Através da Figura 3.1, que representa o modo de funcionamento de uma ligação corrente ao corte, percebe-se que é necessário um ajustamento das folgas inevitáveis à execução para que a ligação entre em funcionamento, pois, é fundamental que a chapa e o parafuso entrem em contacto para que haja transferência de cargas entre ambos. Ao estabelecer o contacto, e com o aumento da força aplicada, ocorrerá a rotura da ligação quando for atingida a tensão de rotura ao corte no parafuso ou a resistência ao esmagamento da chapa, conforme a componente menos resistente.

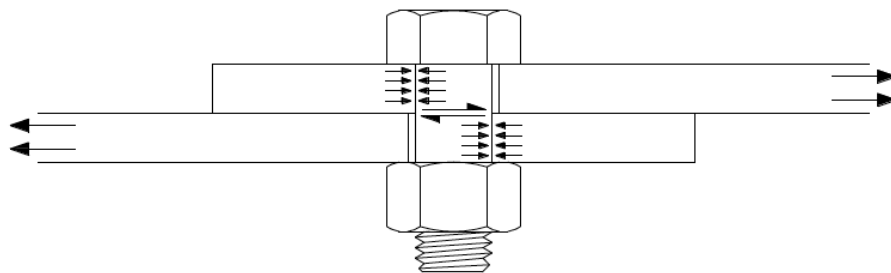


Figura 3.1 - Modo de funcionamento de uma ligação convencional ao corte (Carvalho, 2012)

3.3 Formulação Proposta pela Parte 1-8 do Eurocódigo 3 para Ligações Convencionais ao Corte

O procedimento de cálculo para ligações convencionais ao corte proposto pelo Eurocódigo 3, aplicado com as devidas reservas à ligação em estudo, tem em consideração os seguintes modos de rotura:

- Resistência ao esmagamento ou pressão diametral;
- Perfis à tracção;
- Parafusos ao corte;
- Rotura em bloco da chapa.

Tratando-se de uma ligação aparafusada, é necessário proceder à furação dos perfis. Os espaçamentos e distâncias mínimas às extremidades dos perfis são definidos de acordo com a cláusula 3.5 da parte 1-8 do Eurocódigo 3. Esses espaçamentos são apresentados abaixo, na Figura 3.2.

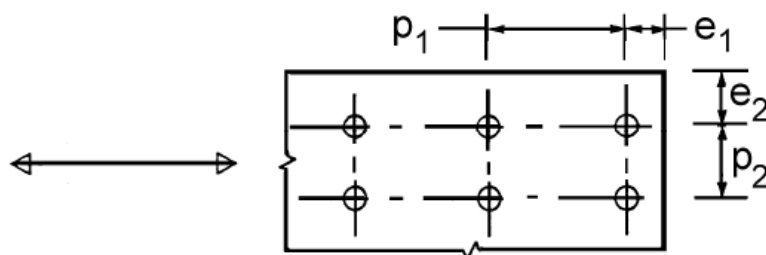


Figura 3.2 - Espaçamentos mínimos entre parafusos (Eurocódigo 3 Parte 1-8, 2010)

Os espaçamentos definidos na Figura 3.2 devem obedecer aos valores mínimos calculados através das expressões 4, 5 e 6 definidas na cláusula 3.5.2 – Quadro 3.3 do EC3 – 1-8, onde d_0 corresponde ao diâmetro do furo.

$$e_1 = e_2 = 1,2 \cdot d_0 \quad (4)$$

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 \quad (5)$$

$$p_2 = 2,4 \cdot d_0 \quad (6)$$

Devido à presença dos furos, e como estabelecido na cláusula 6.2.3 do Eurocódigo 3 Parte 1-1, é necessário calcular uma área útil reduzida da secção transversal resistente. Na Figura 3.3 é apresentada a representação gráfica de uma chapa ligada por aparafusamento (Simões, 2007), com duas secções de rotura (secções 1 e 2).

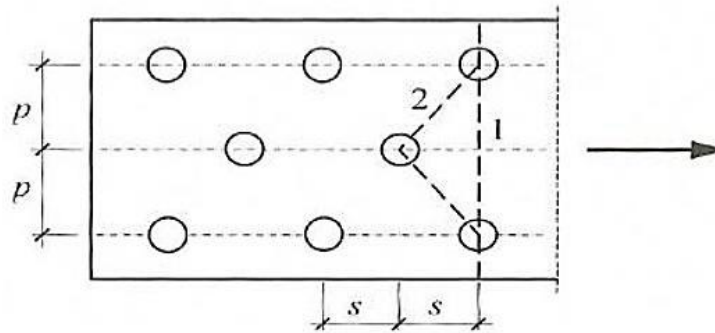


Figura 3.3 - Área útil de uma secção transversal (A_{net})

A área útil, A_{net} , é avaliada de acordo com a cláusula 6.2.2. do Eurocódigo 3-1-1, sendo definida como o menos dos dois valores definidos na expressão 7.

$$A_{net} = \min \left\{ A - n \times t \times d_0; A - n \times t \times d_0 + \sum \frac{s^2}{4 \times p} \right\}, \quad (7)$$

em que:

A é a área da secção transversal bruta;

n é o número total de parafusos usados na ligação;

t é a espessura do tubo.

A resistência da ligação é avaliada de acordo com o pressuposto na cláusula 3.6.1 – Quadro 3.4 do Eurocódigo 8, parte 1-8. Para o caso em estudo, efectuaram-se as seguintes verificações:

- Resistência do perfil ao esmagamento, $F_{b,Rd}$, dada pela expressão 8:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}, \quad (8)$$

em que:

k_1 é um factor de redução definido pelo EC3 – 1-8, Quadro 3.4;
 α_b é um factor de redução definido pelo EC3 – 1-8, Quadro 3.4;
 f_u é a tensão de rotura do aço do perfil;
 d é o diâmetro nominal de um parafuso;
 γ_{M2} é o coeficiente parcial de segurança.

- Resistência do perfil à tracção, $N_{t,Rd}$, dada pela expressão 9:

$$N_{t,Rd} = \min \left\{ N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}; N_{u,Rd} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} \right\}, \quad (9)$$

em que:

f_y é a tensão de cedência do aço;
 γ_{M0} é o coeficiente parcial de segurança.

- Resistência dos parafusos ao corte, $F_{v,Rd}$, dada pela expressão 10:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (10)$$

em que:

α_v é um factor de redução definido pelo EC3 – 1-8, Quadro 3.4;
 f_{ub} é a tensão de rotura à tracção de um parafuso;
 A_s é a área útil de um parafuso, medida na zona roscada.

Apesar de as formulações apresentadas dizerem respeito a ligações convencionais, e por ausência de outras mais adequadas à ligação em estudo, essas formulações foram aplicadas na previsão teórica da resistência das ligações apresentada no subcapítulo 5.3 e calculada nos Anexos.

4. AVALIAÇÃO NUMÉRICA

4.1 Introdução

O contínuo desenvolvimento de ferramentas computacionais e recursos informáticos permite que, cada vez mais, se recorra à análise e dimensionamento de estruturas utilizando o método dos elementos finitos. Em estruturas metálicas é corrente a modelação com famílias de elementos bidimensionais e tridimensionais. Em termos genéricos, o Eurocódigo 3 permite a utilização do método dos elementos finitos e métodos avançados de análise. A parte 1-5 do EC 3 inclui já um anexo (Anexo C) especificamente dedicado a esta metodologia (Simões da Silva *et al*, 2007).

Apesar da modelação numérica ser uma ferramenta poderosa, esta não deve ser usada com displicência pois poderá fornecer resultados distantes da realidade. No caso em estudo, a modelação numérica é relativamente complexa, pois envolve fenómenos complicados de simular, como o contacto entre os parafusos e os perfis da ligação. Outros aspectos a modelar são: geometria da ligação, leis constitutivas dos materiais e condições de fronteira e carregamento. Aspectos como a não linearidade geométrica e material foram também considerados no modelo. Dada a natureza tridimensional do problema, optou-se pela escolha de elementos finitos do tipo sólidos por serem os mais adequados na simulação do contacto entre as várias componentes da ligação.

4.2 Descrição da Modelo Numérico

4.2.1 Programa de elementos finitos utilizado

Nos modelos numéricos desenvolvidos no âmbito da presente tese foi usado o programa de elementos finitos ABAQUS. Na construção dos modelos através do ABAQUS foi necessário considerar de forma adequada os seguintes aspectos:

- família;
- graus de liberdade (directamente relacionado com a família a que pertence o elemento);

- número de nós;
- formulação;
- integração.

A Figura 4.1 mostra as diferentes famílias de elementos que é possível adoptar, sendo a principal diferença entre elas a geometria que cada um assume. A primeira letra do nome de um elemento indica a que família este pertence. Por exemplo, o S do elemento S4R indica que este é do tipo “Shell”.

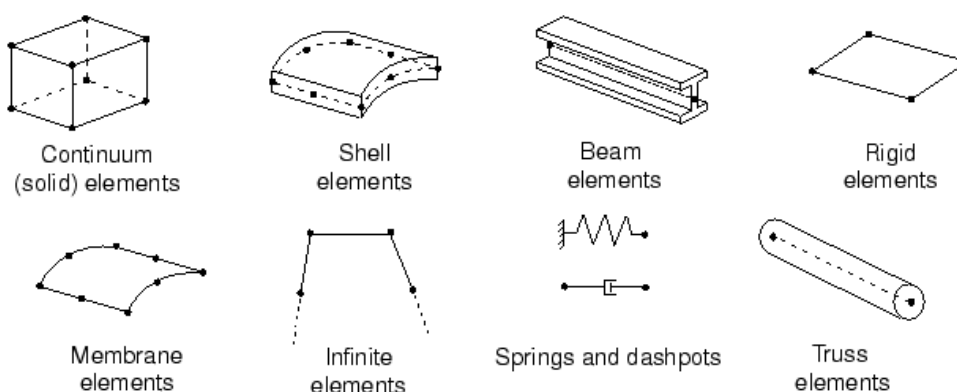


Figura 4.1 – Famílias de elementos finitos

Os graus de liberdade são as variáveis fundamentais calculadas durante a análise. Para uma análise de tensão/deslocamento, os graus de liberdade correspondem às translações de cada nó. Alguns elementos, tais como os do tipo “Shell” e “Beam”, possuem também graus de liberdade rotacionais.

Os deslocamentos, rotações ou outros graus de liberdades são calculados apenas nos nós de cada elemento. Num outro ponto qualquer do elemento são calculados por interpolação a partir dos nós, sendo a ordem da interpolação determinada pelo número de nós que o elemento possui, como é ilustrado na Figura 4.2. Por exemplo, os elementos que possuem nós apenas nos vértices, tal como o indicado na Figura 4.2 a), usam uma interpolação linear em cada direcção, pelo que são chamados de elementos lineares ou de primeira ordem.

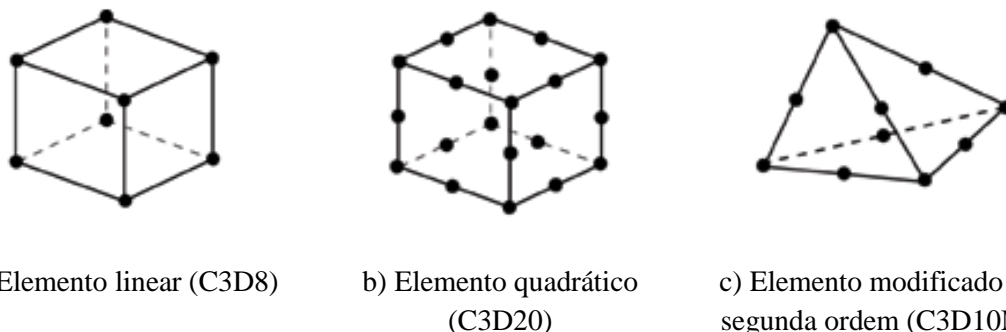
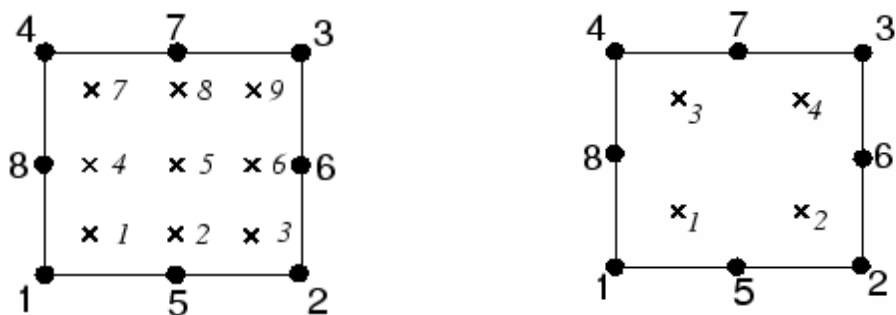


Figura 4.2 - Exemplo de classificação de elementos pelo número de nós

A formulação de um elemento diz respeito à teoria matemática utilizada para definir o comportamento do mesmo. Dependendo da natureza do problema, poderá ser utilizada uma formulação Lagrangeana ou Euleriana. Quando o material associado a um elemento continua associado ao mesmo durante a análise, ou seja, quando o material não é capaz de atravessar as fronteiras do elemento, é utilizada uma formulação Lagrangeana. Uma formulação Euleriana é utilizada, por exemplo, quando se trata de uma análise térmica.

O ABAQUS utiliza técnicas numéricas para integrar diferentes quantidades em relação ao volume de cada elemento. Usando a quadratura de Gauss, é avaliada a resposta do material em cada ponto de integração do elemento, que podem ser de integração completa ou reduzida. A diferença entre os dois tipos de integração está no número de pontos de Gauss necessários para integrar os polinómios da matriz de rigidez de um elemento, como é possível observar na Figura 4.3. A distinção entre os elementos de integração reduzida e integração completa é feita através da letra “R” no fim do nome dos elementos, sendo o “R” correspondente aos elementos de integração reduzida.



a) Elemento quadrático de integração completa (CPS8)

b) Elemento quadrático de integração reduzida (CPS8R)

Figura 4.3 - Pontos de integração de um elemento bidimensional

As ligações estudadas na presente tese foram modeladas com elementos C3D8R, tratam-se de elementos sólidos hexaédricos de 8 nós, cada um com três graus de liberdade (u , v e w) e apresentam 2x2 pontos de Gauss de integração reduzida. A não linearidade geométrica baseou-se na formulação Lagrangeana, o que permite grandes deformações e rotações, e a não linearidade geométrica foi representada através da definição das leis constitutivas elasto-plásticas dos materiais.

4.2.2 Geometria

No âmbito da presente tese foram analisadas duas tipologias distintas, que diferem entre si no perfil utilizado e na tipologia do parafuso. Dentro destas duas tipologias, estudaram-se vários modelos em que se fez variar alguns parâmetros, nomeadamente, o diâmetro do parafuso e as dimensões do elemento exterior e interior. No Tabela 1 são indicadas todas as ligações modeladas e analisadas.

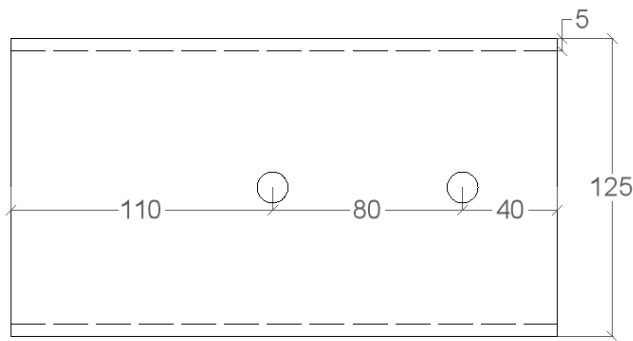
Ligação nº:	Perfil	Diâmetro do parafuso	Tipo de parafuso
1	CHS125x5	M12	Cabeça de tremoço
2	CHS125x5	M16	Cabeça de tremoço
3	CHS125x5	M16	Cabeça de embeber
4	CHS125x5	M20	Cabeça de embeber
5	CHS200x8	M20	Cabeça de embeber
6	CHS200x8	M24	Cabeça de embeber
7	SHS100x5	M12	Cabeça de tremoço
8	SHS100x5	M16	Cabeça de tremoço
9	SHS100x5	M16	Cabeça de embeber
10	SHS100x5	M20	Cabeça de embeber
11	SHS160x8	M20	Cabeça de embeber
12	SHS160x8	M24	Cabeça de embeber

Tabela 1 – Resumo das ligações analisadas

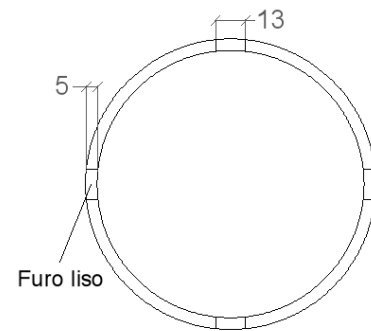
A ligação nº1 é igual a uma das ligações ensaiadas experimentalmente por Carvalho (2012); os resultados experimentais deste ensaio serão posteriormente usados para a calibração dos modelos numéricos.

A Figura 4.4 diz respeito à ligação com perfil circular e com parafusos de cabeça de tremoço segundo a norma ISO 7380, enquanto que a Figura 4.5 representa a ligação com perfil circular e com parafusos de cabeça de embeber segundo a norma ISO 10642. A Figura 4.6 e 4.7 representam as ligações com perfis quadrangulares com parafusos de cabeça de tremoço e de

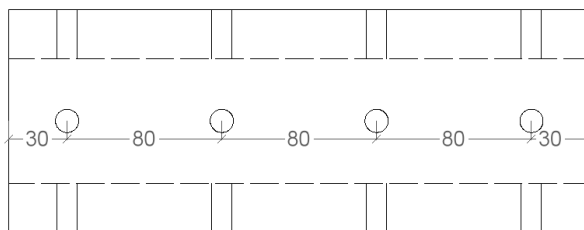
embeber, respectivamente. Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentadas as ligações com perfis circulares e quadrangulares de maiores dimensões em relação às restantes, sendo nestas utilizados apenas parafusos de cabeça de embeber. Todas as dimensões foram adoptadas em função dos provetes ensaiados por Carvalho (2012).



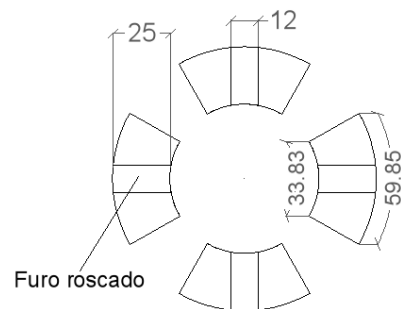
a) Vista lateral do elemento exterior



b) Vista de topo do elemento exterior

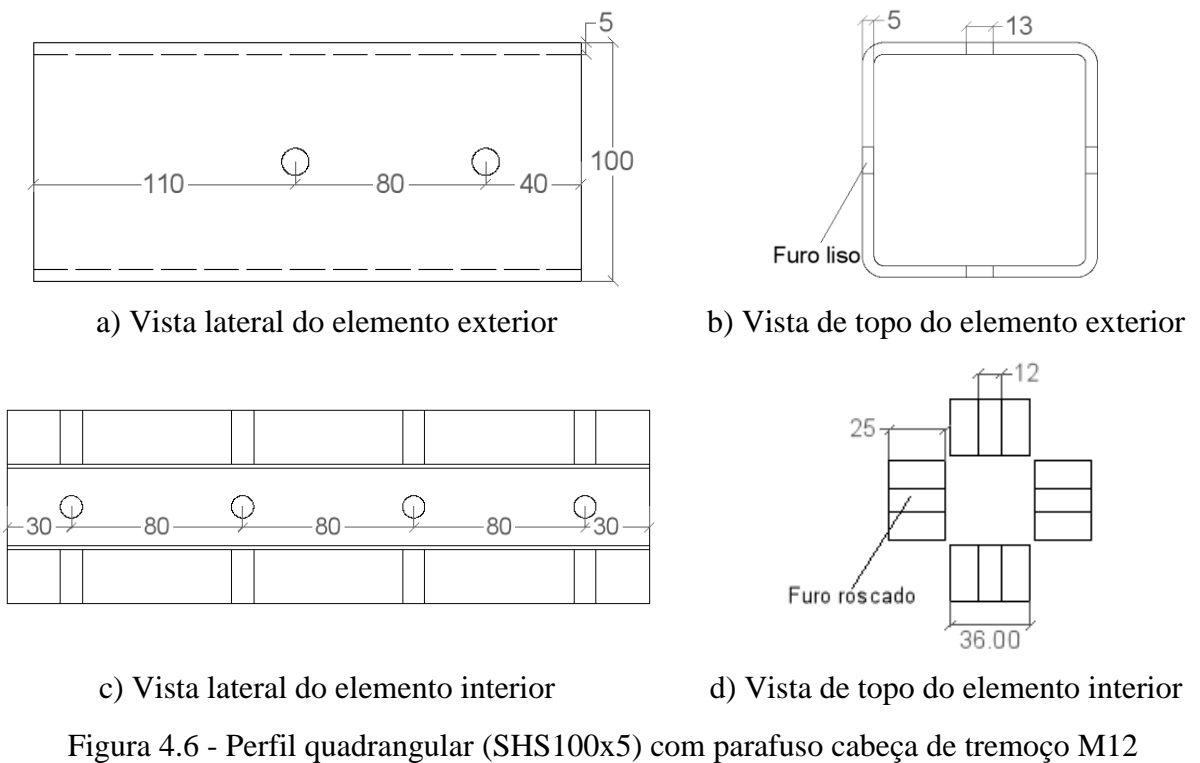
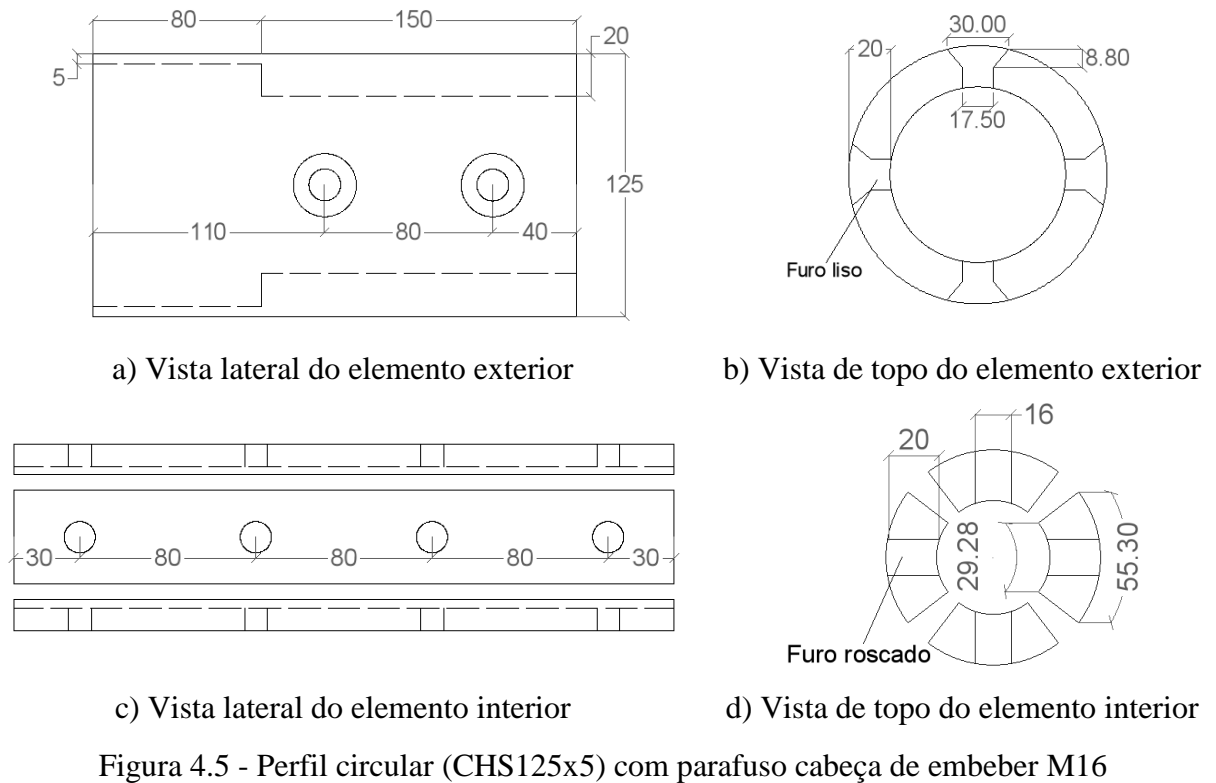


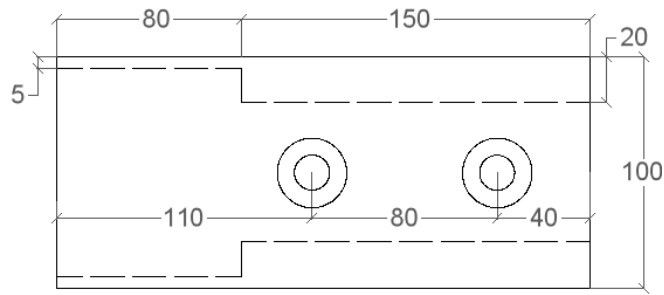
c) Vista lateral do elemento interior



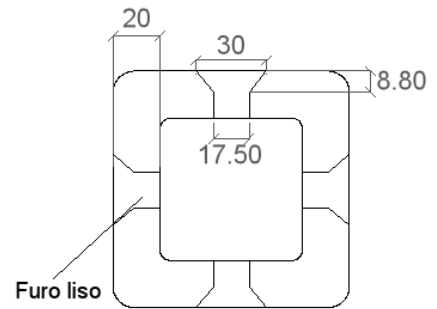
d) Vista de topo do elemento interior

Figura 4.4 - Perfil circular (CHS125x5) com parafuso cabeça de treçoço M12

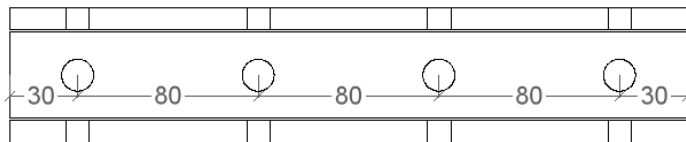




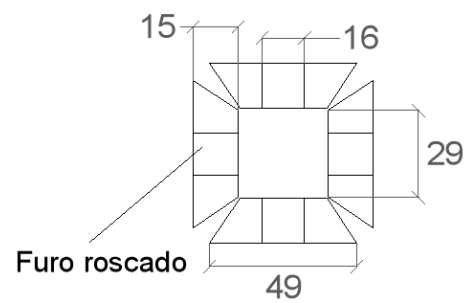
a) Vista lateral do elemento exterior



b) Vista de topo do elemento exterior



c) Vista lateral do elemento interior



d) Vista de topo do elemento interior

Figura 4.7 - Perfil quadrangular (SHS100x5) com parafuso cabeça de embeber M16

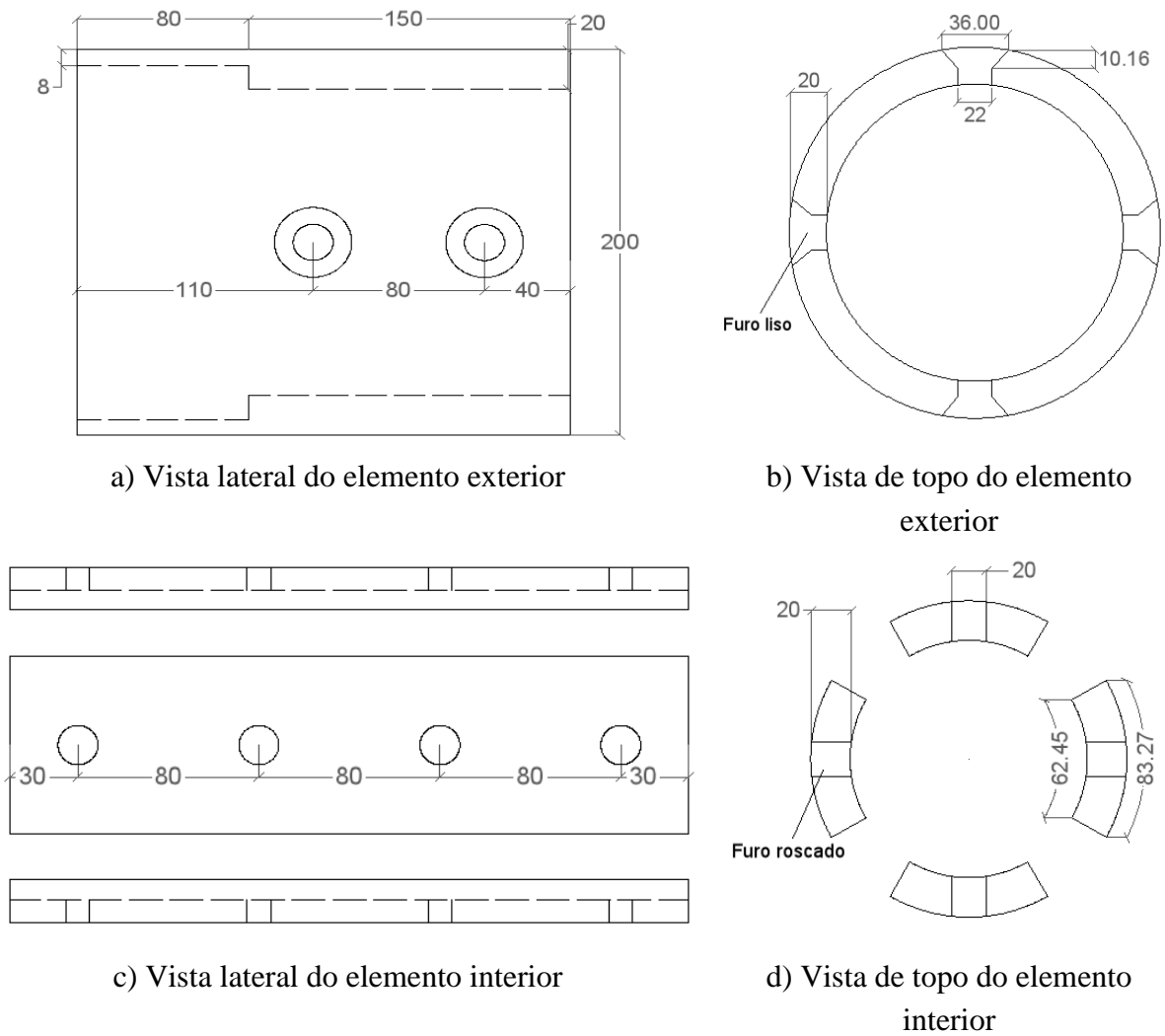


Figura 4.8 - Perfil circular (CHS200x8) com parafuso cabeça de embeber M20

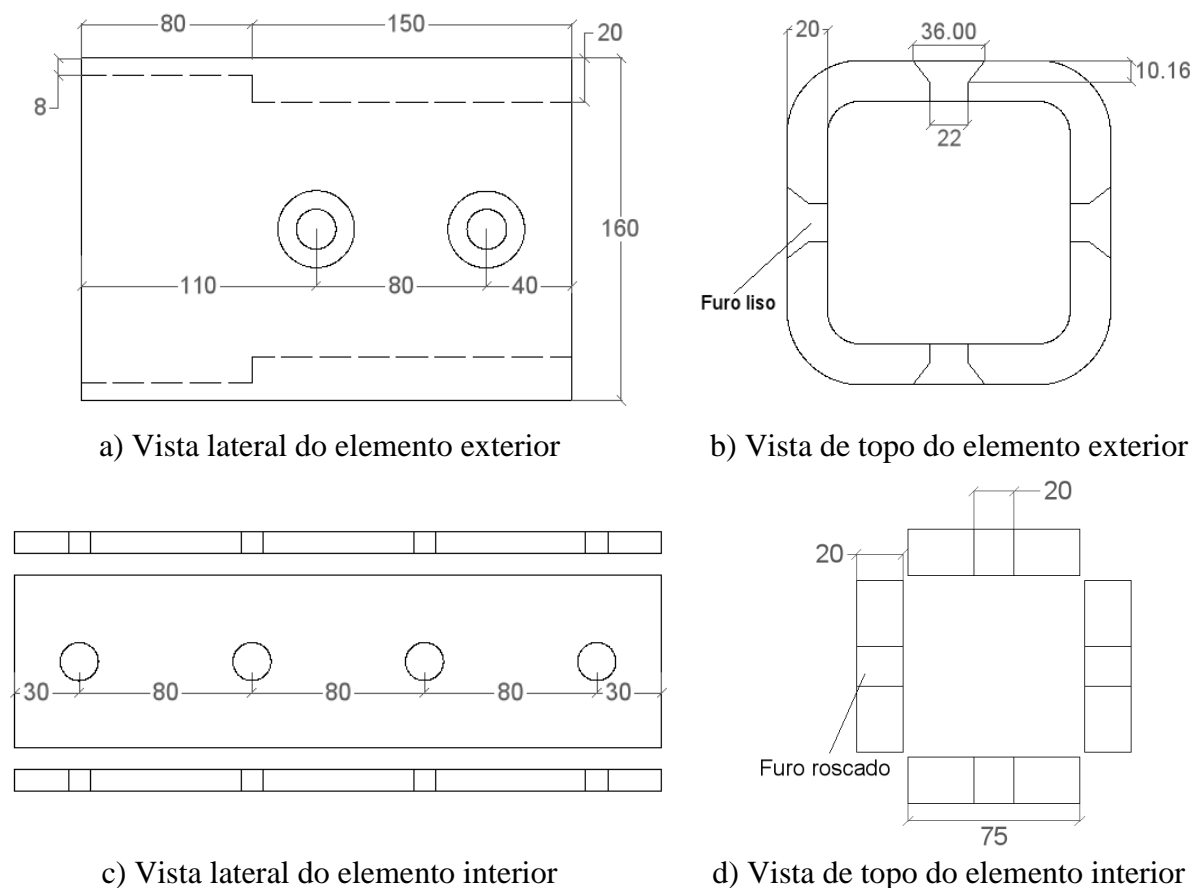


Figura 4.9 - Perfil quadrangular (SHS160x8) com parafuso cabeça de embeber M20

Devido à complexidade do modelo, e de maneira a diminuir o tempo de cálculo, optou-se por estudar apenas um modelo representativo de um oitavo da ligação, como é exemplificado na Figura 4.10.

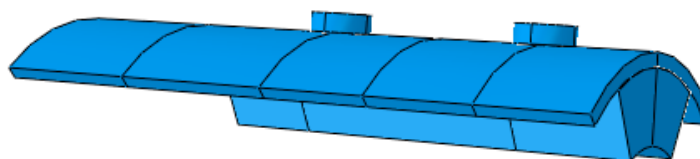


Figura 4.10 – Modelo representativo da ligação número 1

4.2.3 Condições de apoio e de carregamento

As condições de fronteira são definidas segundo as direcções globais e foram aplicadas de modo a restringir os deslocamentos nas superfícies do elemento exterior em contacto com as

garras da máquina de tracção. Relativamente ao carregamento, este foi aplicado como um deslocamento na extremidade do elemento interior, como é possível observar na Figura 4.11.

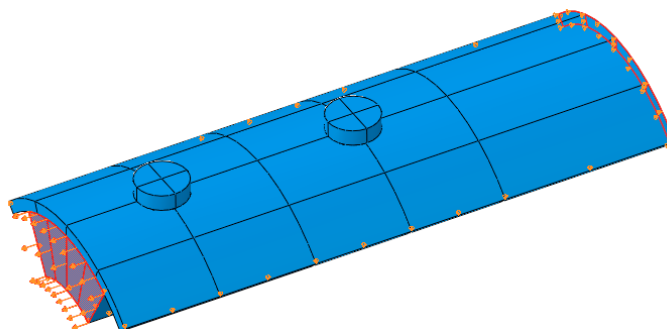


Figura 4.11 – Condições de apoio na direcção z

4.2.5 Material

O material aço, tanto para o elemento exterior e interior como para os parafusos, foi definido como isotrópico com comportamento elasto-plástico, e com um coeficiente de Poisson de 0,3 (Simões da Silva *et al*, 2010). No caso do parafuso, não se dispunham de ensaios de caracterização mecânica pelo que foram usados os valores nominais da classe 10.9 e admitiu-se uma extensão máxima de 8%. Deste modo para os parafusos foram definidos os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade, $E = 210$ GPa;
- Tensão de cedência de 900 MPa;
- Tensão de rotura de 1000 MPa.

As propriedades mecânicas do aço do perfil exterior e interior foram definidas através dos ensaios realizados por Carvalho (2012), tendo sido definidos os seguintes parâmetros:

- Módulo de elasticidade, $E = 210$ GPa;
- Tensão de cedência de 354,9 MPa;
- Tensão de rotura de 504,2 MPa.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentadas as curvas que representam as características mecânicas do aço dos perfis e dos parafusos, respectivamente.

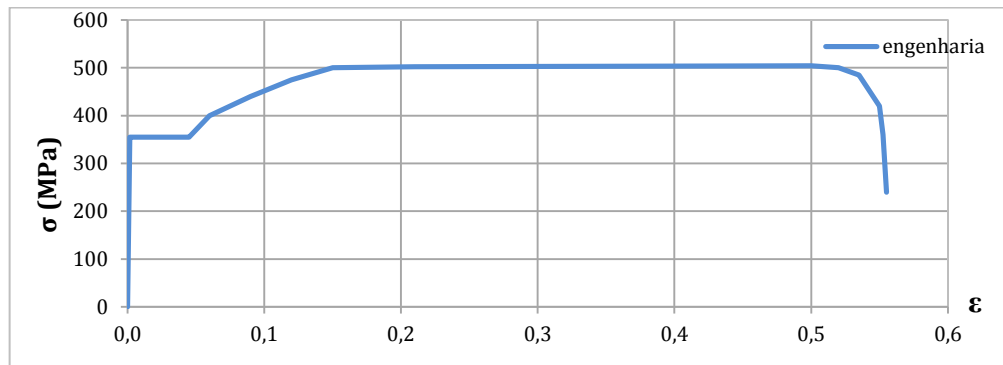


Figura 4.12 - Curva do aço dos perfis (valores de engenharia)

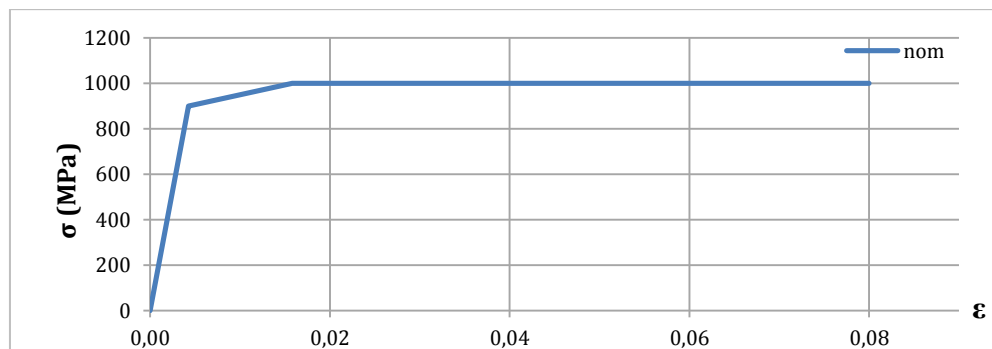


Figura 4.13 – Curva do aço dos parafusos (valores nominais)

No ABAQUS, a plasticidade dos materiais dúcteis é definida usando os valores da tensão real e da deformação plástica real. Inicialmente calcularam-se os parâmetros necessários para obter a curva extensão-deformação real, através das seguintes expressões:

$$\sigma_{real} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (14)$$

A deformação plástica real é obtida subtraindo a deformação elástica real, definida pela razão entre a tensão real e o módulo de Young, à deformação total, como é definido na equação 15.

$$\varepsilon_{pl,real} = \varepsilon_{t,real} - \frac{\sigma_{real}}{E} \quad (15)$$

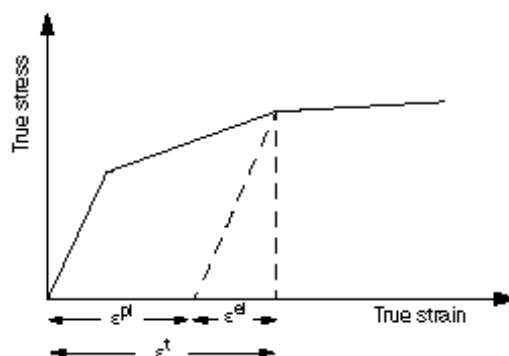


Figura 4.14 – Decomposição da deformação total nas componentes elástica e plástica

4.3 Calibração do Modelo Numérico

Um dos requisitos de uma análise numérica em elementos finitos é a calibração do modelo a utilizar com recurso a resultados obtidos, normalmente, através de ensaios laboratoriais. Neste caso, a calibração foi efectuada com recurso aos ensaios realizados por Carvalho (2012), referenciado no subcapítulo 2.2, em particular aos resultados do ensaio correspondente à ligação 1 da Tabela 1 apresentada no subcapítulo 4.2.2 deste documento.

4.3.1 Descrição do ensaio experimental

Neste subcapítulo apresenta-se de forma sintética o ensaio experimental referido (ligação 1 da Tabela 1). O programa experimental consistiu na preparação, montagem e ensaio de provetes metálicos à tracção até à rotura que pretende simular a ligação da forma mais autêntica possível. De modo a compreender o comportamento global do modelo, na realização dos ensaios foram medidas a força actuante e a deformação da ligação. Para medir a deformação foram utilizados dois transdutores de deslocamento, com capacidade para medir deslocamentos até 25 mm, dispostos em posições diametralmente opostas de modo a avaliar possíveis excentricidades ou defeitos no modelo, como é ilustrado na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Posição dos transdutores de deslocamento

Para a ligação em estudo, usada aqui para efeitos de calibração dos modelos numéricos, foram realizados três ensaios, B1, B2 e B3. A relação entre a força aplicada e a deformação dos provetes, é apresentada na Figura 4.16. A leitura da deformação foi realizada com base na medição do deslocamento relativo entre as duas peças exteriores dos provetes. Desta forma esta medição inclui toda a deformação da ligação, incluindo a deformação dos tubos entre chapas de topo (ver Figura 4.15)

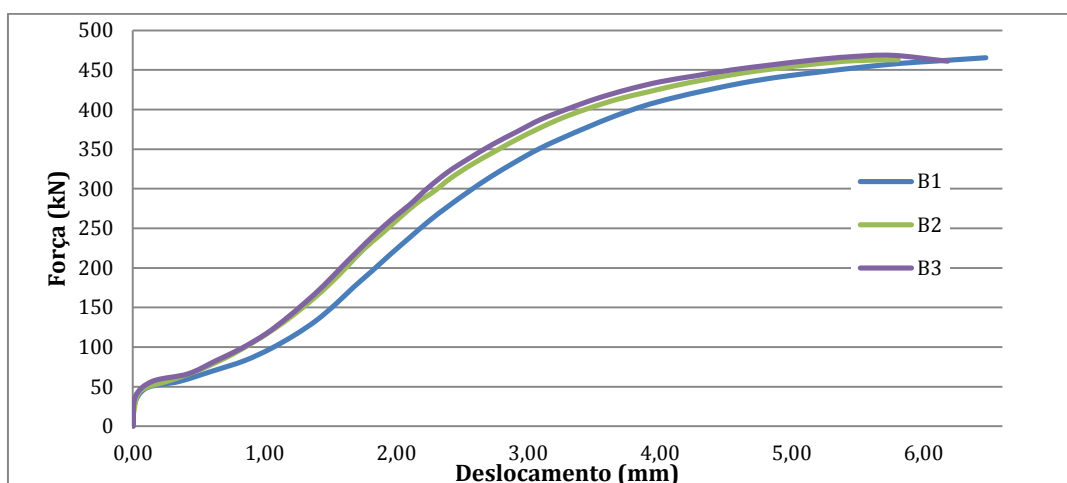


Figura 4.16 – Relação força-deslocamento da ligação 1 (parafusos M12 cabeça de tremoço)

Analisando o desenvolvimento das curvas verifica-se que, na fase inicial da aplicação da força, a ligação apresenta um deslocamento quase nulo para uma força até 50 kN, sendo a

resistência devida à força de aperto aplicada nos parafusos. Com o aumento da força dá-se uma quebra significativa na rigidez devido à anulação das folgas entre os parafusos e o perfil exterior, necessárias à montagem da ligação. Anuladas as folgas de montagem, observa-se um aumento da inclinação do gráfico, que demonstra um ganho de rigidez. Nesta fase começa-se a dar o esmagamento do perfil exterior pelos parafusos, com um crescimento constante da força até aos 300 kN. A partir desta carga observa-se uma quebra progressiva na rigidez, tornando-se o esmagamento da chapa mais acentuado, até à rotura que acaba por ser por corte nos parafusos (Figura 4.17).



a) Esmagamento da chapa



b) Modo de rotura dos parafusos

Figura 4.17 – Modo de rotura observado experimentalmente

4.3.2 Estudo de convergência da malha

Um modelo deve ter uma malha suficientemente refinada de modo a reproduzir convenientemente a realidade mas que não leve a um consumo excessivo de tempo de cálculo. A malha criada inicialmente teve como base uma geometria menos refinada, de modo a obter resultados iniciais dos quais se pudesse aferir o próximo passo a tomar (Dias, 2011).

Para a discretização do parafuso foi necessária uma malha muito refinada, de modo a conseguir-se simular o complexo estado de tensão nele existente. Segundo Coelho (2004), um mínimo de 12 a 16 nós devem ser definidos ao longo da circunferência do furo do parafuso. Foram adoptados 24 nós, tanto para a circunferência do furo como do parafuso.

Para o estudo de convergência da malha foram testadas várias configurações, com diferentes níveis de discretização na zona dos furos e fazendo variar o número de elementos ao longo do comprimento e espessura dos diferentes componentes. Na Figura 4.18 pode-se observar a discretização da malha final usada no modelo da ligação 1. O número de elementos em que cada componente da ligação foi discretizado foi igual para as restantes ligações.

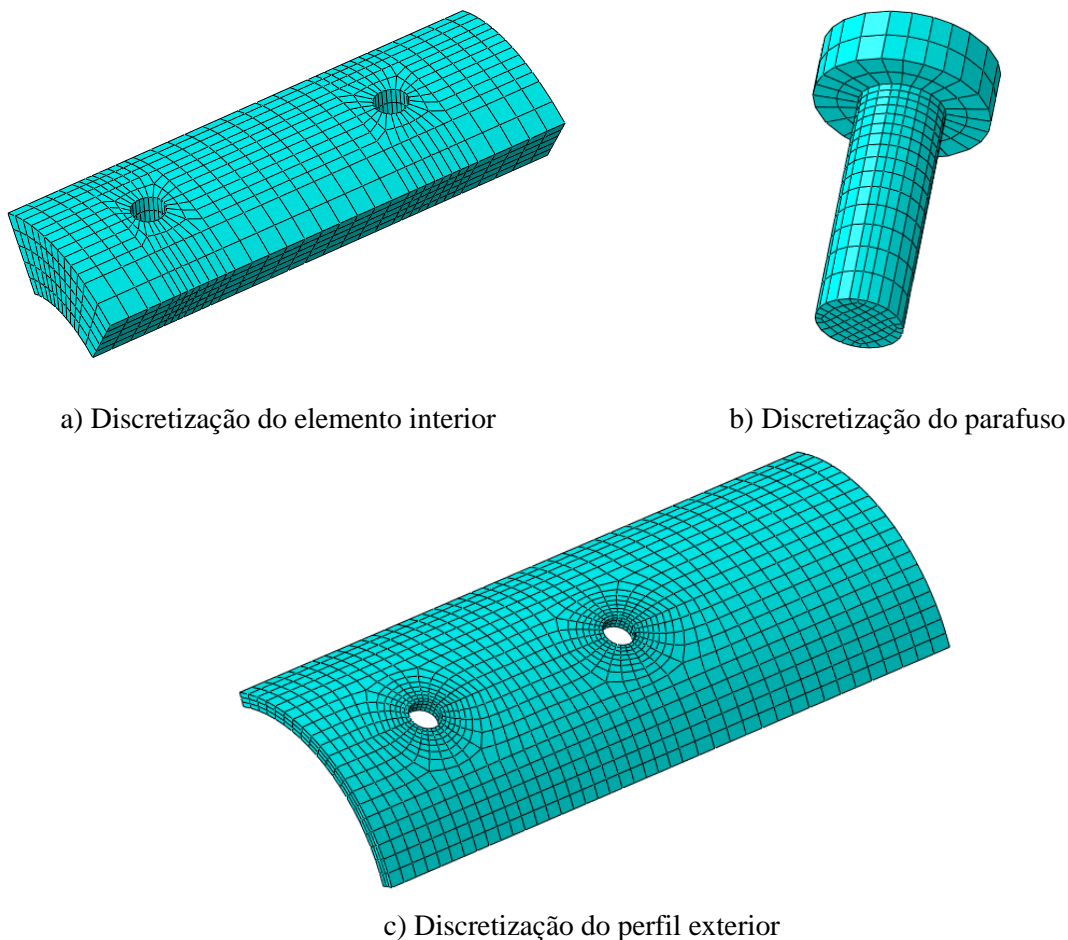


Figura 4.18 - Discretização usada no modelo da ligação 1

4.3.3 Outros parâmetros

De maneira a conseguir uma boa calibração recorreu-se a um processo iterativo e faseado, de forma a obter uma curva força-deslocamento que se aproximasse à obtida experimentalmente, onde variaram-se os seguintes parâmetros:

- Diâmetro dos furos do perfil exterior;
- Coeficiente de atrito entre os três elementos da ligação.

Devido à existência de uma folga entre os parafusos e o perfil exterior é possível que, devido a erros de montagem, os parafusos não fiquem perfeitamente centrados em relação aos furos, sendo possível haver uma variação da dimensão da folga que existe entre os mesmos. Numa primeira fase, de maneira a simular estes possíveis erros de montagem, variou-se o diâmetro dos furos do perfil exterior (Figura 4.19). É importante referir que os parafusos foram

modelados com a sua área útil e não com a área real, o que resulta numa diminuição do diâmetro dos mesmos.

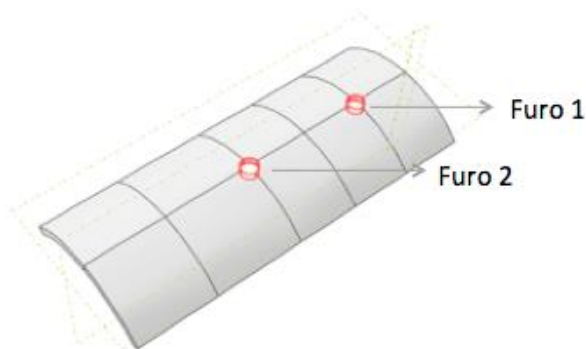


Figura 4.19 – Diâmetro dos furos do perfil exterior a alterar

No ponto de partida deste processo admitiu-se que os parafusos estão perfeitamente centrados e efectuou-se uma redução do diâmetro dos furos, proporcional à redução do diâmetro do parafuso, de forma a obter a mesma folga que se verificava no ensaio experimental. Na Figura 4.20 são apresentadas as curvas força-deslocamento consideradas mais relevantes (curvas 1, 2 e 3), obtidas em função do diâmetro dos furos. Como é possível observar na Figura 4.20, durante o processo de calibração apenas se teve em conta as curvas dos ensaios B2 e B3.

Curva	ϕ Furo 1 (mm)	ϕ Furo 2 (mm)
1	11,36	11,36
2	10,96	11,36
3	10,96	11,56

Tabela 2 – Diâmetro dos furos adoptados para as curvas 1, 2 e 3

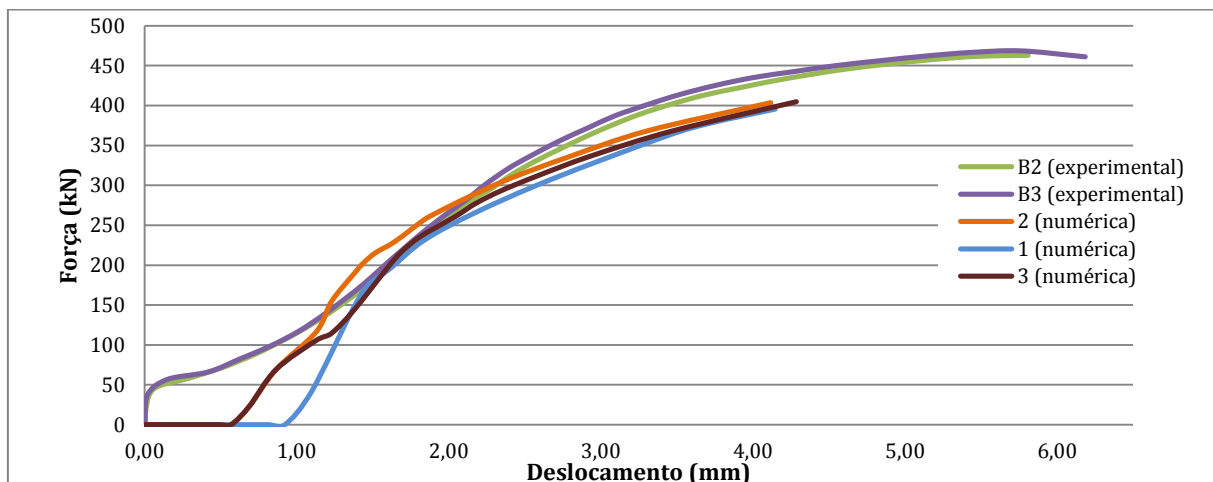


Figura 4.20 – Curvas força deslocamento obtidas (B1 e B2 correspondem às curvas do ensaio 1 e 2, respectivamente)

Analisando o gráfico da Figura 4.20, conclui-se que as folgas que existiam no modelo experimental não foram todas vencidas em simultâneo. Analisando numericamente apenas um modelo representativo de um oitavo da ligação, torna-se extremamente difícil de reproduzir esta situação.

No passo seguinte estudou-se a influência do atrito no comportamento da ligação. Para tal, realizou-se uma nova análise em que se fez variar o coeficiente de atrito. Na Figura 4.21 são apresentadas as curvas 1, 2 e 3 após definir o coeficiente de atrito com o valor de 0,1, que se verificou ser a melhor solução.

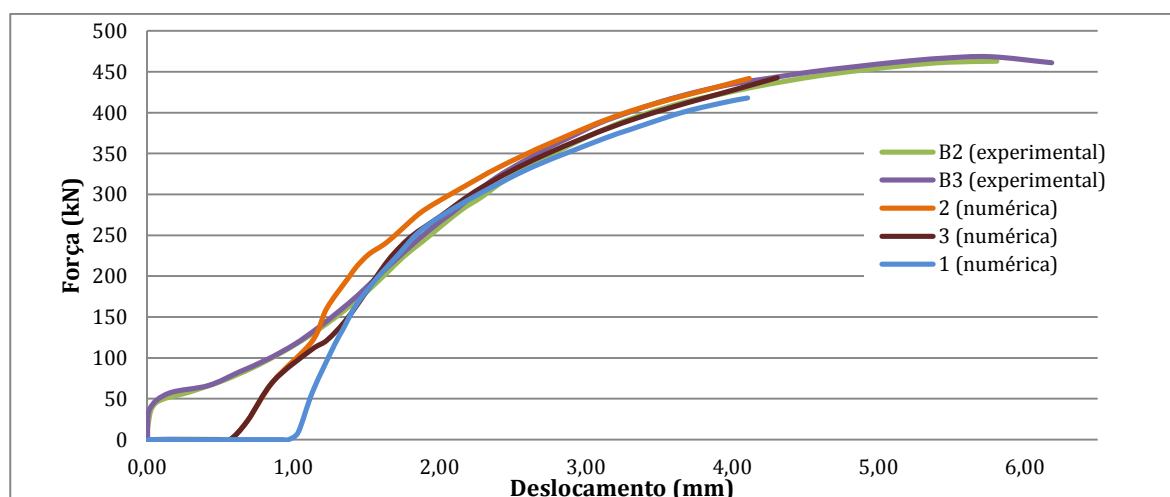


Figura 4.21 – Curvas força-deslocamento obtidas após definir o coeficiente de atrito

Como se pode verificar ao comparar as curvas representadas nas Figuras 4.20 e 4.21, e como seria de esperar, a introdução do atrito faz com que, para que ocorra um mesmo deslocamento, seja necessário aplicar uma força superior.

As três curvas obtidas através dos modelos numéricos têm uma boa aproximação às obtidas experimentalmente. Devido à incerteza da posição exacta dos parafusos em relação aos furos, considerou-se a curva 1 como a melhor solução, visto esta representar a situação ideal a ocorrer na prática, onde os parafusos estão perfeitamente centrados em relação aos furos.

Na Figura 4.25 está representada a curva do modelo numérico obtida no final do processo de calibração.

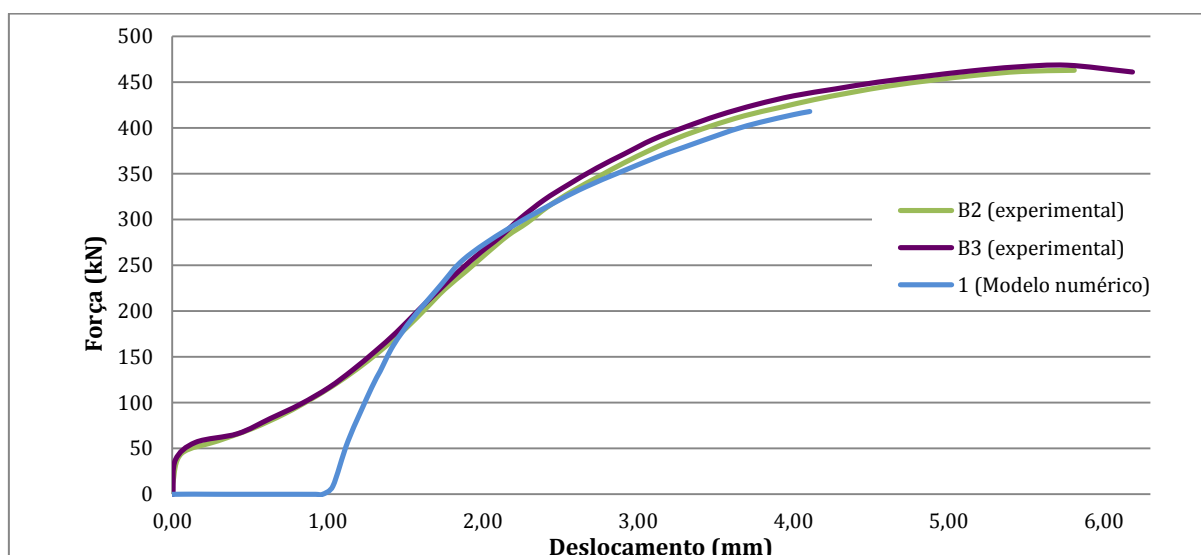


Figura 4.22 – Calibração do modelo numérico

A rigidez inicial que se verifica nas curvas correspondentes aos ensaios experimentais é, como já foi referido, resultante da força de aperto exercida nos parafusos na montagem da ligação. Devido à complexidade envolvida na simulação desta força no programa de cálculo, e visto este efeito não ser relevante no comportamento da ligação (numa perspectiva de avaliação da resistência última), optou-se por desprezá-la ao longo da análise numérica.

Analogamente ao procedimento adoptado na construção do modelo da ligação 1 (curva 1), nas restantes ligações considerou-se que os parafusos estão perfeitamente centrados em relação aos furos do perfil exterior e adoptou-se uma folga de 1,0 mm entre os mesmos. O contacto foi definido com um coeficiente de atrito de 0,1.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Conforme vem sendo referido ao longo do documento, os resultados obtidos nesta análise são apresentados sob a forma de curvas forças-deslocamento. O deslocamento obtido representa o afastamento entre as extremidades dos dois perfis exteriores que compõem a ligação, tal como foi medido no ensaio experimental realizado por Carvalho (2012). Estando analisadas as 12 ligações que foram apresentadas na Tabela 1, é agora importante comparar os resultados obtidos entre elas de modo a ter uma percepção das vantagens e desvantagens de cada uma.

5.1 Ligações com Perfis CHS

Como já foi referido, foram analisadas 6 ligações constituídas por perfis circulares em que se fez variar o diâmetro e o tipo de parafuso, como também as dimensões do perfil exterior e interior.

Para o estudo da ligação com perfis circulares executada com parafusos cabeça de tremço foram analisados dois modelos em que se manteve as propriedades geométricas dos perfis e variou-se o diâmetro dos parafusos, tendo sido utilizados parafusos M12 e M16, que correspondem às ligações 1 e 2, respectivamente. Na Figura 5.1 são apresentadas isoladamente as curvas obtidas relativamente a estas duas ligações.

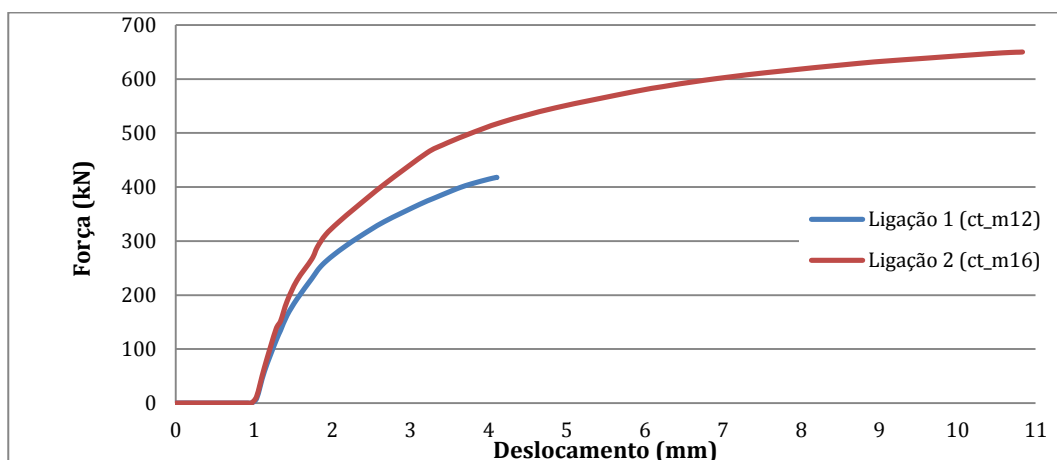


Figura 5.1 – Curvas força-deslocamento das ligações 1 e 2

Analisando o desenvolvimento das curvas verifica-se que na fase inicial a ligação apresenta um deslocamento de 1 mm para uma força nula, que corresponde à fase em que está a ocorrer a anulação das folgas entre os parafusos e o perfil exterior. Após a anulação das folgas, os parafusos começam a trabalhar ao corte e o perfil exterior ao esmagamento verificando um consequente ganho de rigidez, que se traduz num aumento da inclinação da curva. Para a ligação 1, quando a força atinge aproximadamente 230 kN, observa-se uma quebra progressiva na rigidez, tornando-se o esmagamento do perfil exterior mais acentuado até à rotura que se dá por corte nos parafusos, tal como aconteceu no ensaio experimental. Na Figura 5.2 mostra-se, através de um corte, as tensões de Von Mises na ligação quando é atingida a cedência e a rotura dos parafusos.

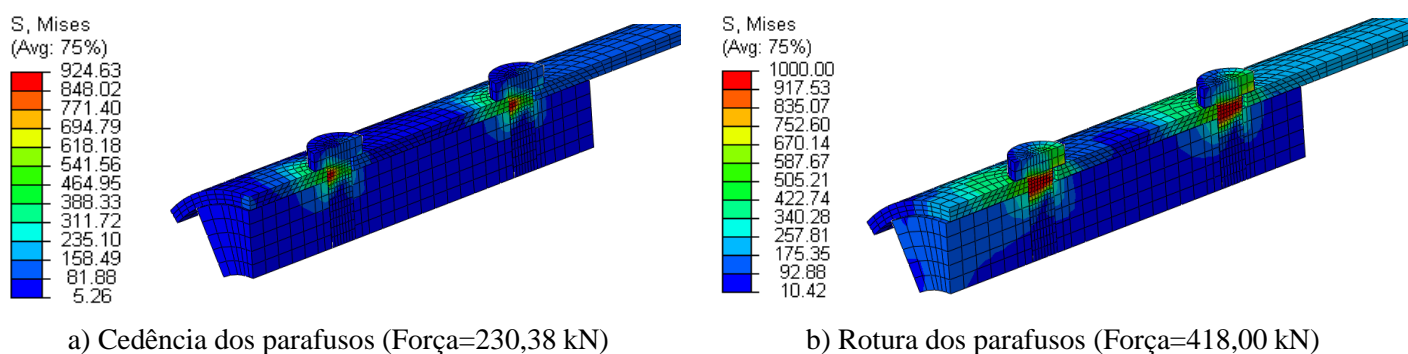


Figura 5.2 – Tensões equivalentes de Von Mises na ligação 1

Na ligação 2, com o aumento do diâmetro do parafuso, observa-se um aumento da rigidez inicial bem como da força resistente da ligação, em comparação à ligação 1. Nesta situação o esmagamento do perfil exterior é mais evidente o que resulta num modo de rotura mais dúctil que corresponde ao corte nos parafusos combinado com o esmagamento do perfil exterior. Tal situação é observada na Figura 5.3, onde estão representadas as concentrações de tensões nos parafusos e no perfil exterior quando acontece a rotura da ligação. Foi atingida uma carga máxima de 650,07 kN que é cerca de 97% da capacidade plástica do perfil exterior à tracção.

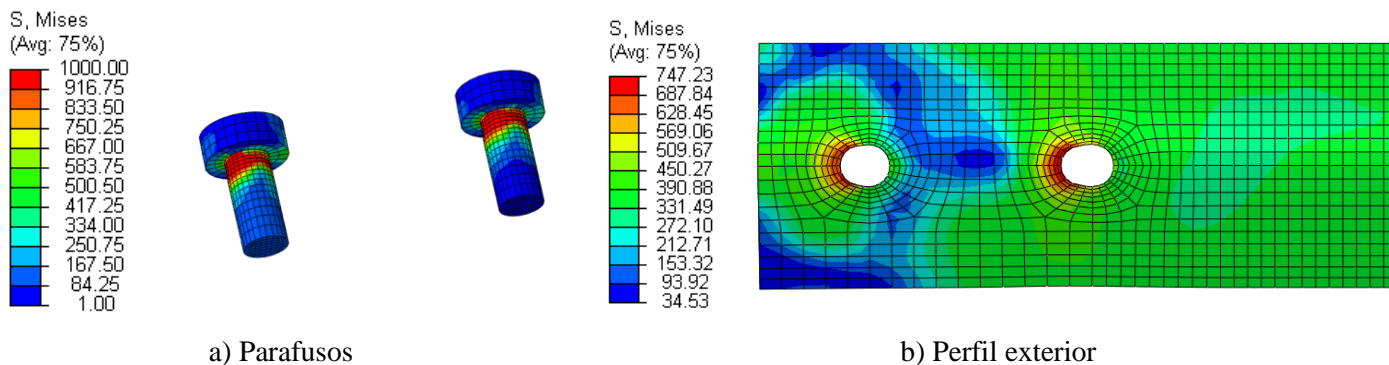


Figura 5.3 – Tensões equivalentes de Von Misses na rotura (ligação 2)

Por forma a criar ligações mais discretas, reproduziram-se as duas ligações anteriores com parafusos de cabeça de embeber M16 e M20 que correspondem às ligações 3 e 4, respectivamente. Na ligação 3 verificou-se que o modo de rotura foi o corte nos parafusos enquanto que na Ligação 4 foi o perfil exterior à tracção, tendo esta atingido um deslocamento bastante superior em relação às restantes. Como se pode observar na Figura 5.4, em ambas as ligações, dá-se uma grande quebra da rigidez, com o deslocamento a aumentar com um aumento da força pouco significativa. Tal acontece devido ao facto de a tensão de cedência ser atingida em simultâneo ao longo de vários pontos do perfil exterior, demonstrado na Figura 5.5 através das zonas plastificadas para dois incrementos de carga sucessivos, um antes e outro após a quebra.

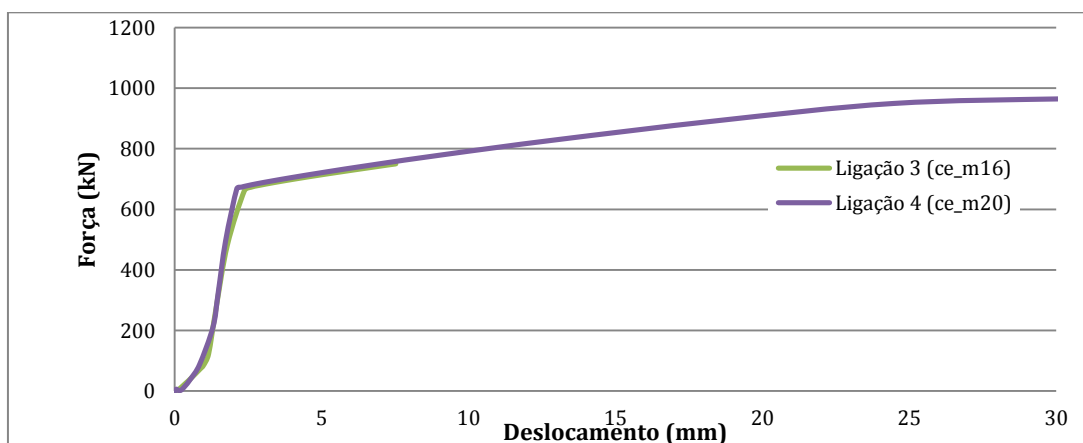


Figura 5.4 – Curvas força-deslocamento das ligações 3 e 4

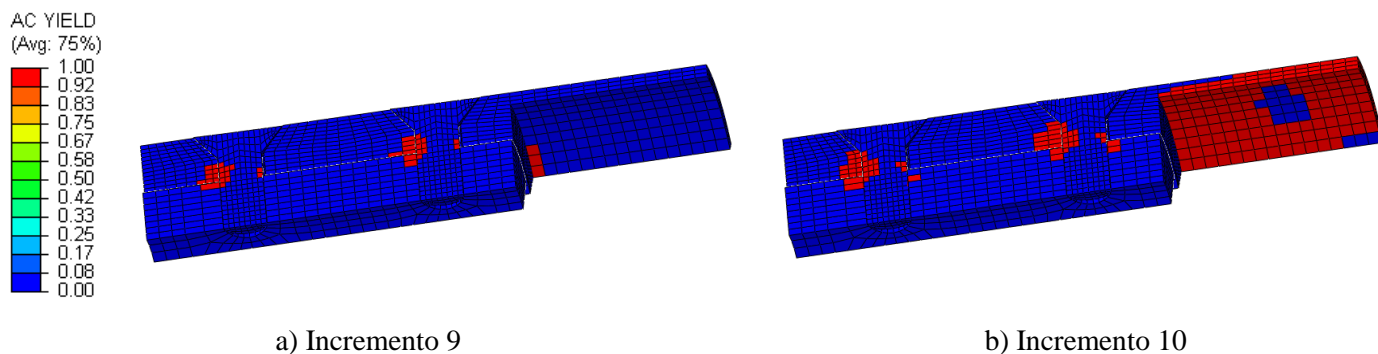


Figura 5.5 – Plastificação do perfil exterior, ligação 4

Na Figura 5.6 são representadas as tensões que se verificam na rotura das ligações 3 e 4.

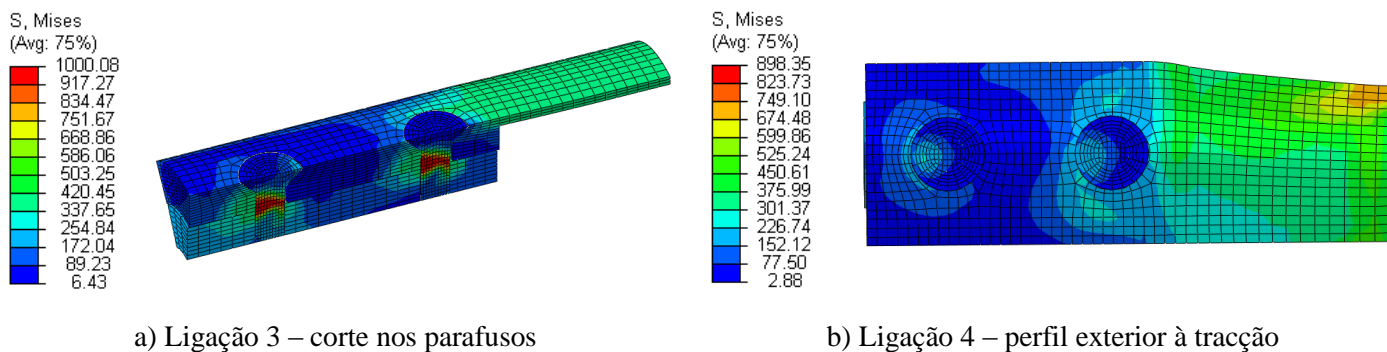


Figura 5.6 – Tensões equivalentes de Von Mises na rotura (ligação 3 e 4)

Comparando os resultados das ligações 2 e 3 conclui-se que ao adoptar parafusos de cabeça de embeber há um aumento da resistência da ligação. Como se pode observar na Figura 5.7, apesar de na ligação 3 existir uma perda repentina da rigidez, o comportamento destas ligações é semelhante.

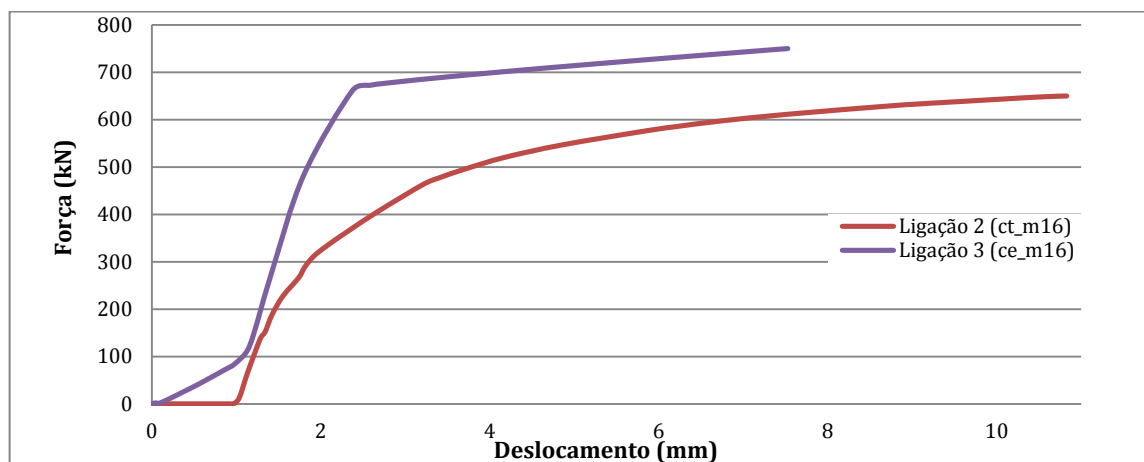


Figura 5.7 – Curvas força-deslocamento das ligações 2 e 3

As ligações 5 e 6 são semelhantes às 3 e 4 mas com perfis e parafusos de maior dimensão: CHS 200x8 e parafusos M20 e M24. Com o aumento dos perfis da ligação verifica-se um aumento considerável da rigidez. Como se pode observar na Figura 5.8, para um deslocamento relativamente pequeno é registada uma força elevada quando comparada com as restantes ligações.

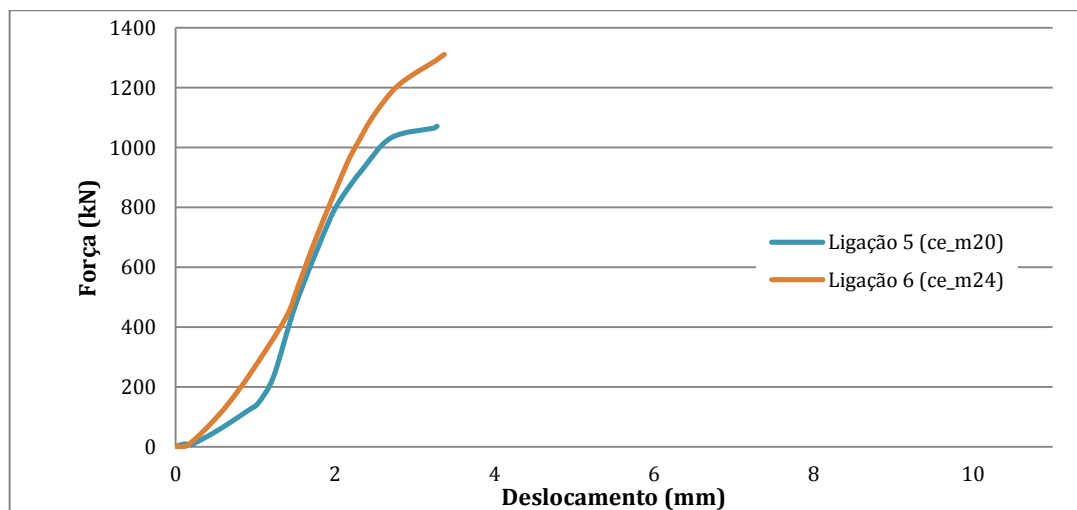


Figura 5.8 – Curvas força-deslocamento das ligações 5 e 6

As ligações 5 e 6 têm um comportamento frágil, com um rotura por corte nos parafusos sem se verificar grandes zonas plastificadas no perfil exterior. Na Figura 5.9 é possível visualizar a distribuição de tensões no momento da rotura das ligações. Neste grupo de ligações se se pretendesse aumentar a resistência (até valores próximos da resistência plástica à tracção do tubo) teria de se aumentar os parafusos, eventualmente para M27.

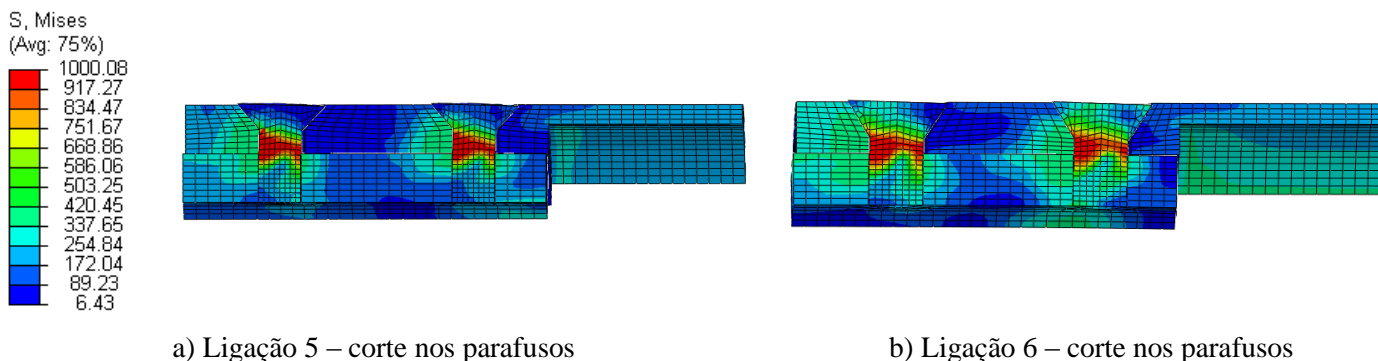


Figura 5.9 - Tensões equivalentes de Von Mises na rotura (ligação 5 e 6)

Na Figura 5.10 são apresentadas as relações força-deslocamento obtidas para todas as ligações desta série.

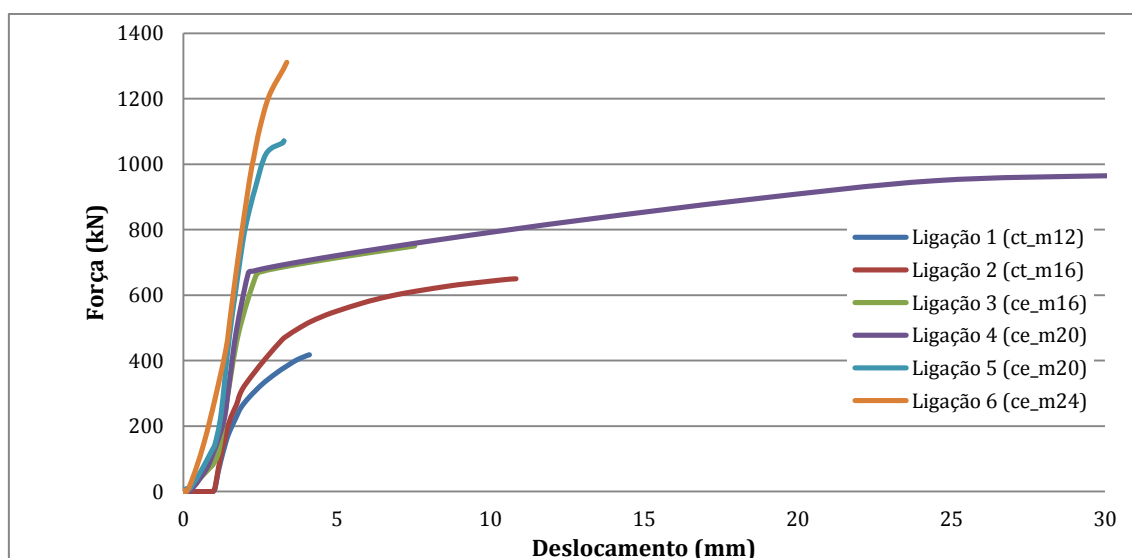


Figura 5.10 - Relação força-deslocamento das ligações com perfis CHS

5.2 Ligações com Perfis SHS

Tal como para os perfis circulares, foram analisadas 6 ligações e variou-se os mesmos componentes que nas ligações anteriores. Os perfis utilizados nesta análise foram escolhidos de maneira a que a sua área fosse aproximadamente igual à dos perfis circulares, de forma a que o seu comportamento fosse semelhante.

Como se pode observar na Figura 5.11, o comportamento destas ligações 7 e 8 aproxima-se muito do comportamento das ligações com perfis CHS (ligações 1 e 2). À medida que ocorre o esmagamento do perfil exterior observa-se uma queda gradual da rigidez da ligação até

atingir a rotura, que acontece por corte nos parafusos em ambas as ligações. A ligação 8 apesar de estar associada a um modo de rotura frágil por corte nos parafusos, apresenta alguma ductilidade que leva a concluir que a plastificação do perfil exterior por esmagamento também teve uma contribuição relevante para a resistência da ligação.

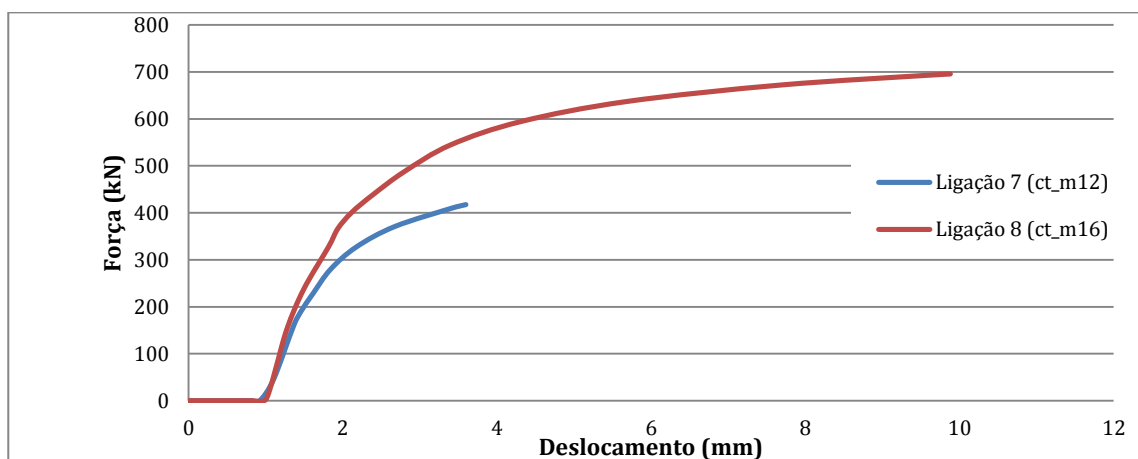


Figura 5.11 – Curvas força-deslocamento das ligações 7 e 8

De seguida, na Figura 5.12, apresenta-se a evolução de tensões de Von Mises em ambas as ligações para que se possa ter noção da influência que a dimensão do diâmetro do parafuso tem no comportamento da ligação e na distribuição de tensões.

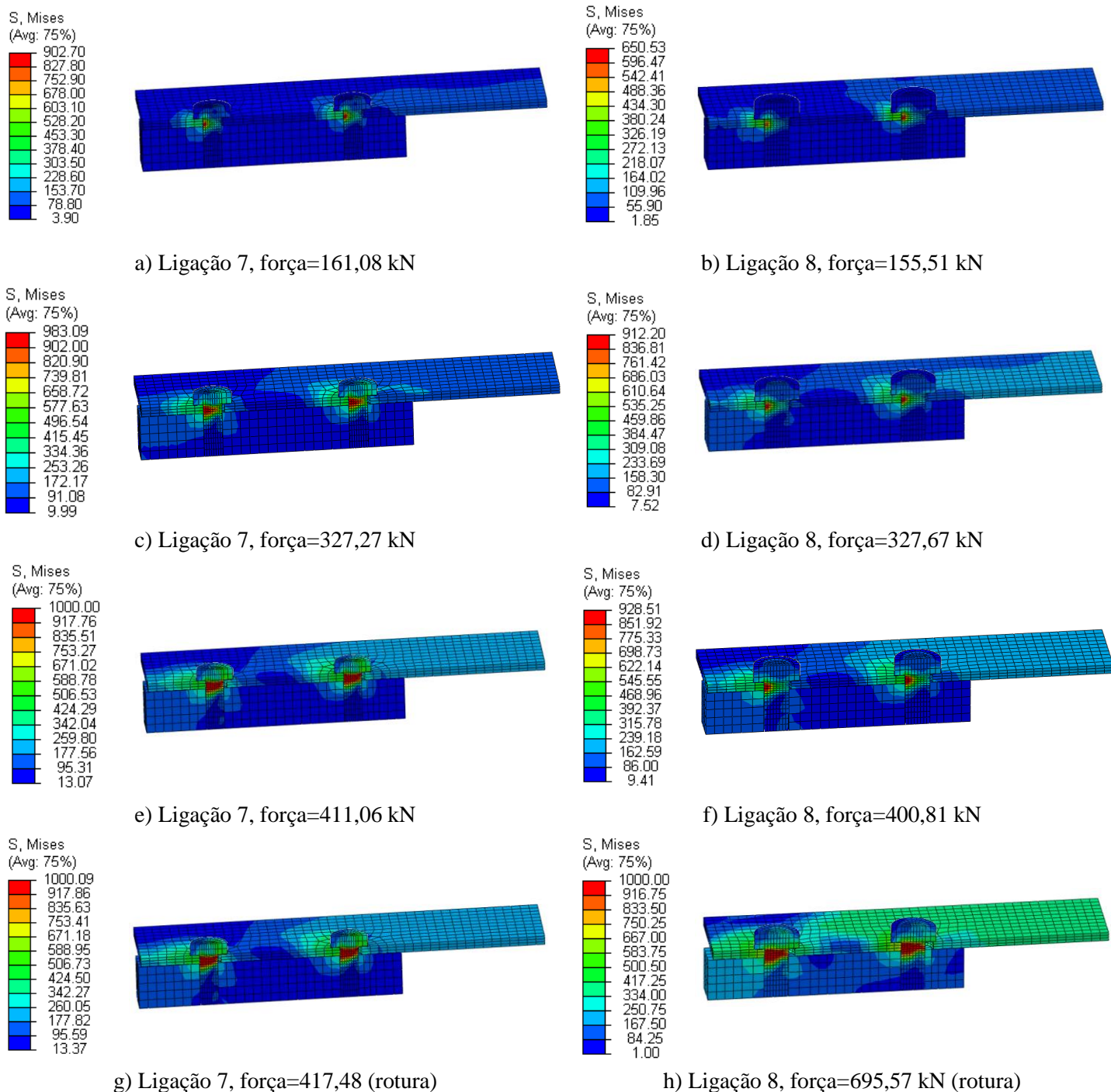


Figura 5.12 – Evolução das tensões equivalentes de Von Misses nas ligações 7 e 8

Para as ligações 9 e 10, que possuem parafusos de cabeça de embeber, verificou-se que a rotura se dá por corte nos parafusos. Na ligação 10, que possui um parafuso maior (M20), observa-se uma maior concentração de tensões no perfil exterior. Estando o perfil exterior mais solicitado, a ligação é capaz de sofrer uma maior deformação como é possível observar

na Figura 5.13. O comportamento destas duas tipologias, bem como a força máxima atingida, é muito semelhante ao que se constatou nas ligações 3 e 4.

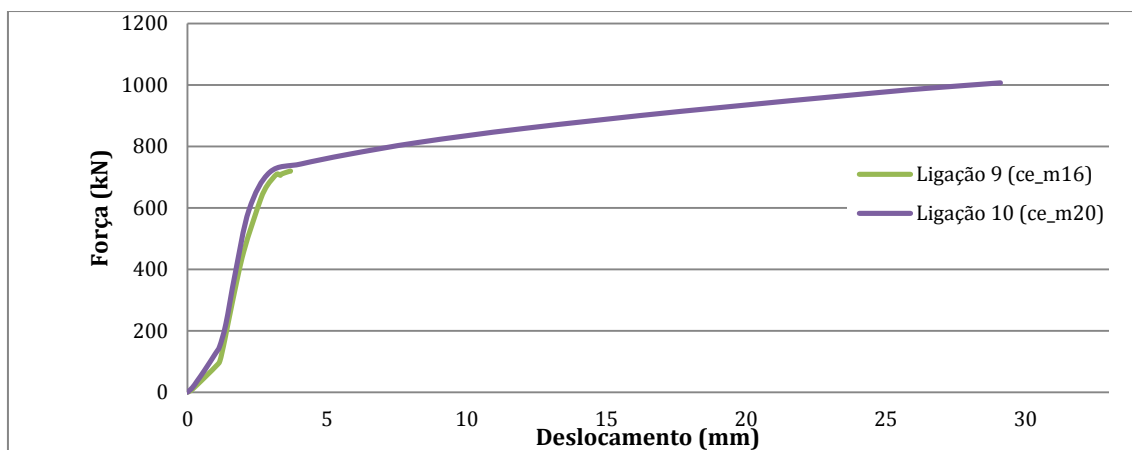
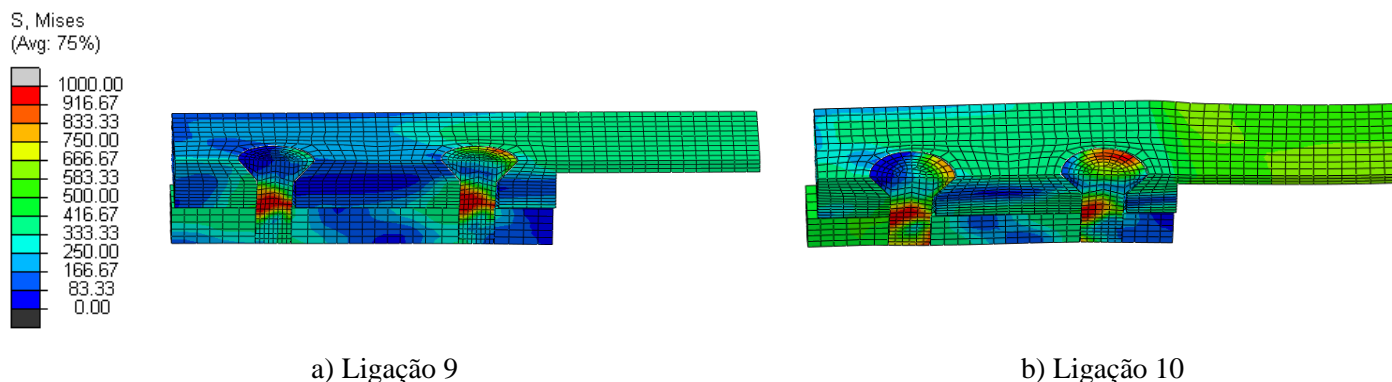


Figura 5.13 – Curvas força-deslocamento das ligações 9 e 10

Na Figura 5.14 é apresentada a distribuição de tensões nas ligações 9 e 10 no momento da rotura, em ambas ligações existe uma maior concentração de tensões nos parafusos.



a) Ligação 9

b) Ligação 10

Figura 5.14 - Tensões equivalentes de Von Misses na rotura

Tal como aconteceu nas ligações com perfis circulares, aumentando a secção do perfil exterior e utilizando parafusos M20 e M24, as ligações apresentam uma rigidez inicial bastante elevada e um comportamento frágil, onde a rotura se dá por corte nos parafusos. Na Figura 5.15 são apresentadas as curvas força-deslocamento das ligações 11 e 12. Como seria de esperar estas tiveram o mesmo comportamento que as ligações 5 e 6.

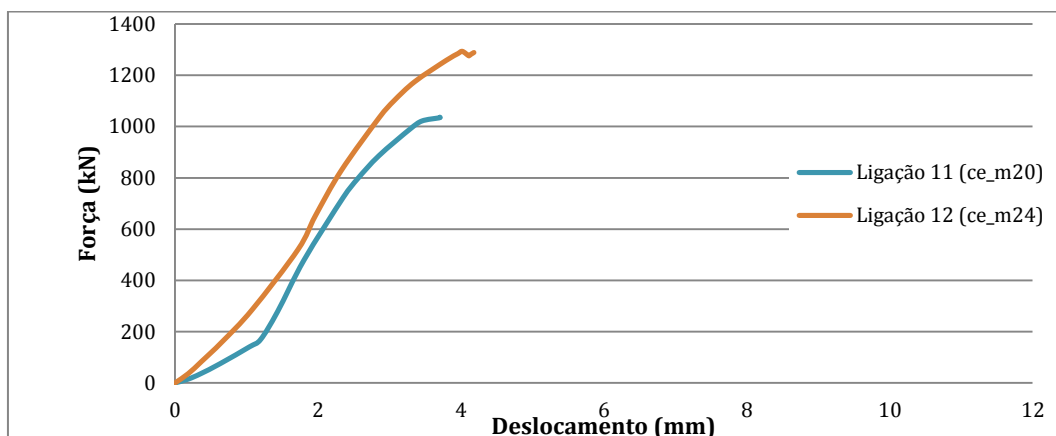


Figura 5.15 - Curvas força-deslocamento das ligações 11 e 12

Como se pode constatar na Figura 5.16, tendo as ligações um comportamento frágil, existe uma maior concentração de tensões nos parafusos. Em relação ao perfil exterior, observa-se que este ainda não se encontra em cedência, apesar de em alguns pontos já ter sido ultrapassada a tensão de cedência. Neste caso, tal como já foi referido para as ligações 5 e 6, aumentar os parafusos poderia ser uma boa opção para elevar a resistência da ligação até valores da ordem da resistência plástica do tubo à tracção e em simultâneo aumentar a ductilidade alterando o modo de rotura.

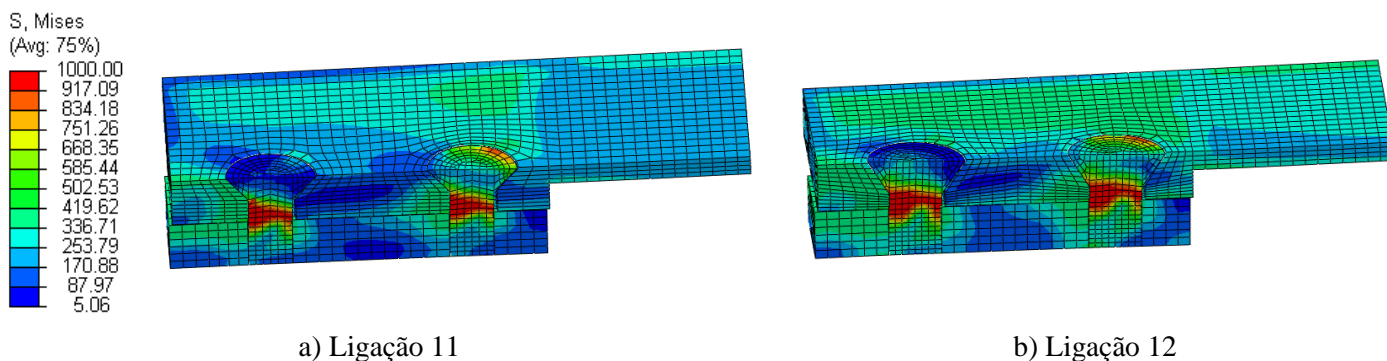


Figura 5.16 - Tensões equivalentes de Von Misses na rotura

De seguida, na Figura 5.17, apresenta-se as curvas força-deslocamento obtidas para as 6 ligações constituídas por perfis SHS.

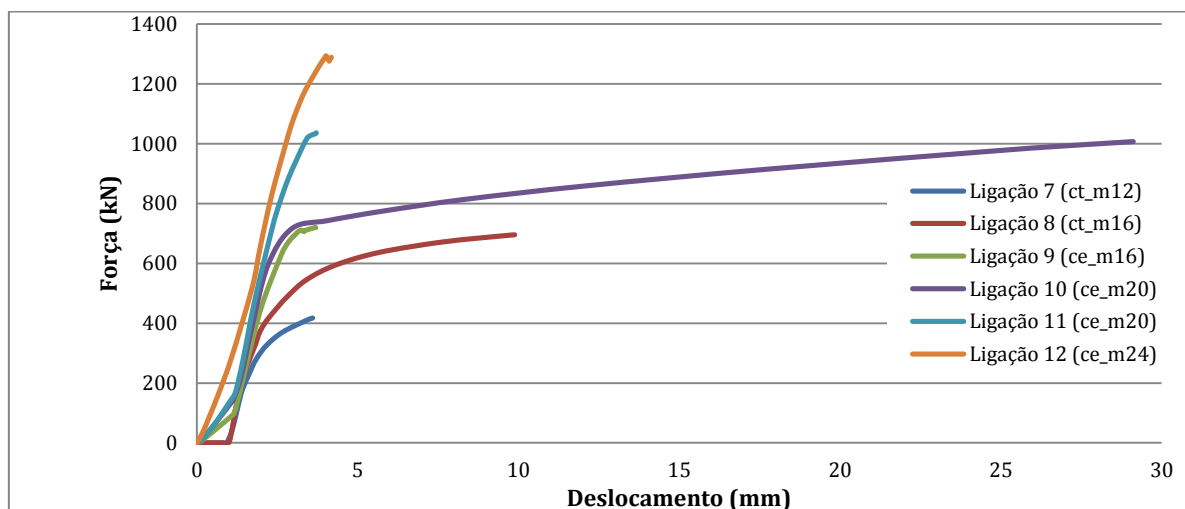


Figura 5.17 - Relação força-deslocamento das ligações com perfis SHS

5.3 Análise Comparativa com Resultados Teóricos

Como já referido, o Eurocódigo 3 Parte 1-8 não faz a distinção entre a metodologia a aplicar a ligações entre chapas planas ou curvas e é omissivo em relação ao cálculo de ligações aparafusadas onde a rosca é realizada no elemento resistente e não existe porca. Por isso torna-se necessário comparar os resultados numéricos com os resultados teóricos, obtidos a partir das formulações disponíveis, com o objectivo de perceber se essas formulações são aplicáveis a estas tipologias.

Na Tabela 3 são apresentados os valores teóricos da resistência das diferentes componentes da ligação obtidos segundo a formulação do EC3 – 1-8 descrita no capítulo 3 deste documento e o valor da força máxima atingida na análise numérica. O cálculo detalhado dos valores teóricos apresentados na Tabela 6 encontra-se no Anexo A do presente trabalho e é realizado usando os valores de engenharia das propriedades do aço dos tubos, os valores nominais das propriedades mecânicas do aço dos parafusos e ainda os valores nominais da geometria dos provetes e respectiva furação. Todos os cálculos foram realizados com os valores característicos, considerando por isso todos os factores de segurança γ_{Mi} como 1,0.

Nas ligações executadas com parafusos de cabeça de tremço (ligações 1, 2, 7 e 8) verifica-se que o modo de rotura teórico é o mesmo que se verificou numericamente, tendo sido o valor teórico da resistência da ligação ligeiramente ultrapassado. Nas ligações 1 e 7 foi observado algum esmagamento do tubo pelos parafusos, mas não condicionante para a resistência da ligação. Nas ligações 2 e 8 o esmagamento foi mais acentuado, tendo se verificado na ligação 2 uma rotura quase simultânea por corte nos parafusos e esmagamento do perfil exterior.

Relativamente às ligações 3 e 4, executadas com perfis CHS e parafusos de cabeça de embreber M16 e M20, respectivamente, verificou-se também o mesmo modo de rotura na análise numérica e analítica e registou-se um valor de resistência da ligação superior ao teórico. Para as ligações com a mesma tipologia de parafusos constituídas por perfis SHS (ligações 9 e 10) obteve-se um modo de rotura por corte nos parafusos o que não corresponde ao modo de rotura teórico. No entanto, o valor da resistência obtido é relativamente próximo do valor da resistência teórico dos parafusos ao corte.

Para as restantes ligações os modos de rotura obtidos analiticamente e numericamente coincidiram, havendo a peculiaridade de, nas ligações com parafusos M24, o valor de resistência numérico ser superior ao teórico, o que não seria de esperar.

		Ligação 1	Ligação 2	Ligação 3	Ligação 4	Ligação 5	Ligação 6	Ligação 7	Ligação 8	Ligação 9	Ligação 10	Ligação 11	Ligação 12	
Teóricos Valores	Perfil	CHS125x5	CHS125x5	CHS125x5	CHS125x5	CHS200x8	CHS200x8	SHS100x5	SHS100x5	SHS100x5	SHS100x5	SHS160x8	SHS160x8	
	Parafuso	M12	M16	M16	M20	M20	M24	M12	M16	M16	M20	M20	M24	
	Tipo Parafuso	C. Tremeço	C. Tremeço	C. Embeber	C. Embeber	C. Embeber	C. Embeber	C. Tremeço	C. Tremeço	C. Embeber	C. Embeber	C. Embeber	C. Embeber	
	Esmagamento perfil exterior - $F_{b,Rd}$ (kN)	605,04	702,15	2217,33	2359,38	2359,38	2026,88	605,04	702,15	2217,33	2359,38	2359,38	2026,88	
	Perfil exterior à tracção - $N_{t,Rd}$ (kN)	668,99	668,99	668,99	668,99	1711,68	1711,68	653,02	653,02	653,02	653,02	653,02	1646,74	1646,74
	Esmagamento perfil interior - $F_{b,Rd}$ (kN)	2676,14	3137,24	2535,41	2857,13	2857,13	2808,01	2676,14	3137,24	1901,55	2142,85	2142,85	2857,13	2808,01
	Perfil interior à tracção - $N_{t,Rd}$ (kN)	1580,97	1399,46	954,75	809,54	1918,58	1773,37	1089,07	907,56	626,22	517,31	517,31	2031,12	1885,91
	Parafusos ao corte - $F_{v,Rd}$ (kN)	337,20	628,00	628,00	980,00	980,00	1412,00	337,20	628,00	628,00	628,00	980,00	980,00	1412,00
	Resistência da Ligação	337,20	628,00	628,00	668,99	980,00	1412,00	337,20	628,00	626,22	517,31	517,31	980,00	1412,00
	Modo de Rotura	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Perfil à tracção	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Perfil interior à tracção	Perfil interior à tracção	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte
ABAQUS	Força máxima atingida (kN)	418,00	650,07	750,16	980,01	1071,27	1311,34	417,48	695,57	720,06	1007,04	1036,10	1293,42	
	Modo de Rotura	Parafuso ao corte	Esmagamento chapa/parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Perfil à tracção	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	Parafuso ao corte	
Rácio = $\frac{\text{Resit. Teórica}}{\text{Força Máx. Atingida}}$		0,81	0,97	0,84	0,68	0,91	1,08	0,81	0,90	0,87	0,51	0,95	1,09	

Tabela 3 - Resistência teórica e numérica das ligações

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Este trabalho tinha por objectivo o estudo de novas tipologias de ligação de emenda entre perfis tubulares, através de análise numérica. Dos resultados obtidos conclui-se:

- as alterações efectuadas no perfil exterior relativamente aos ensaios com parafusos de cabeça de embeber realizados por Carvalho, nomeadamente o aumento da espessura na zona dos furos, impedem a rotação dos parafusos e conferem melhor comportamento às ligações;
- Com as configurações de ligações de emenda propostas, se adequadamente concebidas, é possível atingir valores de resistência da ordem de grandeza da resistência plástica dos perfis a ligar;
- a adopção de parafusos de cabeça de embeber com o objectivo de obter ligações mais discretas, em detrimento dos parafusos de cabeça de tremoço, resulta num aumento da resistência da ligação;
- a formulação dada pelo EC3 – 1-8 para o cálculo de ligações aparafusadas convencionais sujeitas ao corte não é totalmente esclarecedora, quando aplicada às ligações estudadas nesta tese.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Como desenvolvimentos futuros sugere-se:

- Desenvolvimento de modelos numéricos que contemplem a modelação tridimensional das ligações completas;
- Refinamento dos modelos existentes;
- Desenvolvimento de modelos numéricos das ligações executas com perfis CHS200x8 e SHS160x8 com parafusos de maiores dimensões;
- Ensaios de caracterização das propriedades dos parafusos de modo a aferir as suas características mecânicas convenientemente;

- Efectuar ensaios experimentais das ligações estudadas;
- Estudar a aplicabilidade desta tipologia a emendas de pilares, onde para além do esforço axial, possam existir esforços de flexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abelard@. <http://www.abelard.org/france/millau/antrenas4.jpg>. Acesso em: 24 de Junho de 2013.

Alves, S. (2008). “Comportamento de Juntas Soldadas em Nó Interno com Vigas de Diferentes Alturas e Aço de Alta Resistência”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Buil St. Louis@. <http://www.builtstlouis.net/images/eads-bridge04.jpg>. Acesso em: 24 de Junho de 2013.

Cao, J., Packer, J. e Yang, G. (1998). “Yield line Analysis of RHS connections with axial Loads”. *Journal of Constructional Steel Research*.

Carvalho, A. (2012). “Avaliação Experimental de Configurações Inovadoras Para a Execução de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

CISC@. <http://www.cisc-icca.ca/solutions-centre/publications/publications/design/hollow-structural-section-connections-and-trusses#.UfLvSX51Gc4>. Acesso em: 26 de Julho de 2013.

Coelho, A. (2004). “Characterization of the Ductility of Bolted End Plate Beam-to-Column Steel Connections”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Dias, R. (2011). “Ligações em Estruturas Trianguladas com Perfis Circulares Ocos”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Dusicka, P. e Lewis, G. (2009). “High strength steel bolted connections with filler plates”. *Journal of Constructional Steel Research*, pp. 75-84.

Dutta, D., Wardenier, J., Yeomans, N., Sakae, K., Bucak, Ö. e Packer, J. (1998). “Design Guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures”. CIDECT, Colónia.

English Heritage@. http://www.english-heritage.org.uk/content/images/property-defaultimage/iron_bridge_header.jpg. Acesso em: 24 de Junho de 2013.

Firmo, C. (2005). “Arquitetura com Perfis Tubulares – Uma nova linguagem”. Vallourec & Mannesmann Tubes, Brasil.

Igarashi, S., Wakiyama, K., Inoue, K., Matsumoto, T. e Murase, Y. (1985). “Limit Design of high strength bolted tube flange joint, Part 1”. Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 354, pp. 52-66.

Kato, B. e Hirose, A. (1984). “Bolted tension flanges joining circular hollow sections”. CIDECT, BC-84/6E, Tóquio.

Kim, J., Yoon, J.-C. e Kang, B.-S.(2007). “Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints”. Applied Mathematical Modeling 31, pp. 895-911.

Lecce, M. e Packer, J. (2003). “Lap Splice Steel Connections with Stainless Steel Nails”. ASCE-Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 9, pp. 1250-1258.

LNEC@ (2013). <http://www.lnec.pt/qpe/eurocodigos>. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (página internet oficial), Portugal.

Narayanan, R. (1989). “Structural Connections – Stability and Strength”. Elsevier Applied Science, Ascot.

NP EN 1993-1-1 (2010). “Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-8: Regras gerais e regras para edifícios”. Instituto Português da Qualidade.

NP EN 1993-1-8 (2010). “Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projecto de ligações”. Instituto Português da Qualidade.

Matos, R. (2008). “Avaliação Paramétrica da Resistência de Nós de Geometria “T” de Perfis Tubulares”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Resende, A. (2008). “Diagnóstico numérico de vigas Vierendeel formadas por perfis tubulares metálicos de secção circular”. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal da Uberlândia, Uberlândia.

Simões, Rui A. D., (2007) “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”. 2ª Edição. CMM – Associação Portuguesa da Construção Metálica e Mista, Coimbra.

Simões da Silva, L, e Gervásio, H., (2007) “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas: Métodos Avançados”. 1ª Edição. CMM – Associação Portuguesa da Construção Metálica e Mista, Coimbra.

Soares, T. (2012). “Análise de Ligações em Perfis Tubulares com Parafusos de Cabeça Embutida”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Tata Steel, 105th Annual Report, 2011-2012.

Wardenier, J. (2001). “Hollow Sections in Structural Applications”. 1ª Edição. CIDECT, Delft.

Wardenier, J., Kurobane, Y., Packer, J., Van der Vegte, G. e Zhao, X-L. (2008). “Design guide for circular hollow sections (CHS) joints under predominantly static loading”. 2ª Edição. CIDECT, Delft.

Williams, J., Anley, R., Nash, D. E Gray, T. (2009). “Analysis of externally loaded bolted joints: analytical, computacional and experimental study”. International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 420-427.

ANEXOS

A – Cálculo das ligações pelas formulações do EC3

Nesta secção apresenta-se o cálculo da resistência das ligações com base nas formulações e metodologias propostas pelo Eurocódigo 3 – 1-8 apresentadas no capítulo 3 do presente documento. De modo a poder comparar os resultados teóricos com os numéricos, o cálculo foi realizado com os valores característicos considerando por isso todos os factores de segurança γ_{Mi} como 1,0. Apenas será apresentado o cálculo para as ligações 1 e 3, constituídas por parafusos cabeça de tremoço e de embeber, respectivamente. Para as restantes ligações o processo de cálculo é idêntico, variando apenas as propriedades geométricas.

A.1 – Exemplo de cálculo da resistência de uma ligação com parafusos de cabeça de tremoço (Ligação 1)

A.1.1 – Cálculo da resistência do perfil exterior

Os valores mínimos relativos aos afastamentos entre os parafusos são:

$$e_1 = 1,2 \cdot d_0 = 1,2 \times 13,0 = 15,60 \text{ mm}$$

e_2 não existe, uma vez que se trata de um tubo

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 2,2 \times 13,0 = 28,60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 \cdot d_0 = 2,4 \times 13,0 = 31,20 \text{ mm}$$

Os valores dos afastamentos são os apresentados abaixo, cumprindo os valores calculados anteriormente:

$$e_1 = 40 \text{ mm}, \quad p_1 = 80 \text{ mm}, \quad p_2 = 98,17 \text{ mm}$$

O valor de p_2 corresponde a um quarto do perímetro do tubo, uma vez que a ligação é composta por quatro linhas de parafusos igualmente espaçados.

Calculou-se a área útil A_{net} , em cm^2 , considerando a secção mais desfavorável, correspondente à linha um da Figura 3.2.

$$A_{net} = A - n \cdot t \cdot d_0 = 18,85 - 4 \times 0,5 \times 1,30 = 16,25 \text{ cm}^2$$

A resistência ao esmagamento para um parafuso é dada por:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t$$

Sendo o coeficiente $\alpha_b = \text{menor} \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\}$ e $k_1 = \text{menor} \left\{ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\}$, uma vez que perpendicularmente à transmissão de esforços todos os parafusos são interiores.

$$k_1 = \text{menor} \left\{ 1,4 \frac{98,17}{13,0} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

Para os parafusos de extremidade teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{e_1}{3 d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{40}{3 \times 13,0}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 1,0 \times 504,2 \times 12,0 \times 5,0 = 75,63 \text{ kN}$$

Para os parafusos interiores teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{p_1}{3 d_0} - 1,4; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{80}{3 \times 13,0} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 1,0 \times 504,2 \times 12,0 \times 5,0 = 75,63 \text{ kN}$$

Sendo assim, a resistência ao esmagamento nos oito furos será:

$$F_{b,Rd} = 4 \times 75,63 + 4 \times 75,63 = 605,04 \text{ kN}$$

A resistência do perfil exterior à tracção, $N_{t,Rd}$, é:

$$\begin{aligned} N_{t,Rd} &= \text{menor} \{ N_{pL,Rd} = A \cdot f_y; N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u \} \\ &= \text{menor} \{ 18,85 \times 354,9; 0,9 \times 16,25 \times 504,2 \} = 668,99 \text{ kN} \end{aligned}$$

A.1.2 – Cálculo da resistência do perfil interior

Os valores mínimos relativos aos afastamentos entre parafusos são:

$$e_1 = e_2 = 1,2 \cdot d_0 = 1,2 \times 13,0 = 15,60 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 2,2 \times 13,0 = 28,60 \text{ mm}$$

p_2 não existe uma vez que o elemento é seccionado.

Os valores dos afastamentos são os apresentados abaixo, cumprindo os valores calculados anteriormente:

$$e_1 = 40 \text{ mm}, \quad e_2 = 29,93 \text{ mm}, \quad p_1 = 80 \text{ mm}$$

$$A_{net} = A - n \cdot t \cdot d = 11,71 - 1 \times 2,5 \times 1,20 = 8,71 \text{ cm}^2$$

A resistência ao esmagamento para um parafuso é dada por:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t$$

Sendo o coeficiente $\alpha_b = \text{menor} \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\}$ e $k_1 = \text{menor} \left\{ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\}$, uma vez que perpendicularmente à transmissão de esforços todos os parafusos são interiores.

$$k_1 = 2,5$$

Para os parafusos de extremidade teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{e_1}{3 d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{30}{3 \times 13,0}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 0,77$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 0,77 \times 504,2 \times 12,0 \times 25,0 = 290,88 \text{ kN}$$

Para os parafusos interiores teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{80}{3 \times 13,0} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 1,0 \times 504,2 \times 12,0 \times 25,0 = 378,15 \text{ kN}$$

Sendo assim, a resistência ao esmagamento nos oito furos será:

$$F_{b,Rd} = 4 \times 290,88 + 4 \times 378,15 = 2676,14 \text{ kN}$$

A resistência do perfil interior à tracção, $N_{t,Rd}$, é:

$$N_{t,Rd} = \text{menor}\{N_{pL,Rd} = A \cdot f_y; N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u\} \\ = \text{menor}\{4 \times 11,71 \times 354,9; 0,9 \times 4 \times 8,71 \times 504,2\} = 1580,97 \text{ kN}$$

A.1.3 – Cálculo da resistência dos parafusos

A resistência ao corte, $F_{v,Rd}$, para um parafuso é dada pela seguinte expressão:

$$F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,5 \times 1000 \times 84,3 = 42,15 \text{ kN}$$

A resistência total dada pelos 8 parafusos será 337,20 kN.

A.2 – Exemplo de cálculo da resistência de uma ligação com parafusos de cabeça de embeber (Ligação 3)

A.2.1 – Cálculo da resistência do perfil exterior

Os valores mínimos relativos aos afastamentos entre os parafusos são:

$$e_1 = 1,2 \cdot d_0 = 1,2 \times 17,5 = 21,00 \text{ mm}$$

e_2 não existe, uma vez que se trata de um tubo

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 2,2 \times 17,5 = 38,50 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2,4 \cdot d_0 = 2,4 \times 17,5 = 42,00 \text{ mm}$$

Os valores dos afastamentos são os apresentados abaixo, cumprindo os valores calculados anteriormente:

$$e_1 = 40 \text{ mm}, \quad p_1 = 80 \text{ mm}, \quad p_2 = 98,17 \text{ mm}$$

O valor de p_2 corresponde a um quarto do perímetro do tubo, uma vez que a ligação é composta por quatro linhas de parafusos igualmente espaçados.

Calculou-se a área útil A_{net} , em cm^2 , considerando a secção mais desfavorável, correspondente à linha um da Figura 3.2.

$$A_{net} = A - n \cdot t \cdot d_0 = 78,54 - 4 \times 2,0 \times 1,75 = 64,54 \text{ cm}^2$$

A resistência ao esmagamento para um parafuso é dada por:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t$$

De acordo com o estabelecido na cláusula 3.6.1 – Quadro 3.4 do EC3 – 1-8, quando se trata de parafusos de cabeça de embeber, para efeitos de cálculo, a espessura da chapa deve ser diminuída de metade da profundidade do escareamento. Sendo assim:

$$t = 15,60 \text{ mm}$$

Os coeficientes α_b e k_1 são calculados através das expressões, $\alpha_b = \text{menor} \left\{ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\}$ e $k_1 = \text{menor} \left\{ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\}$, uma vez que perpendicularmente à transmissão de esforços todos os parafusos são interiores.

$$k_1 = \text{menor} \left\{ 1,4 \frac{98,17}{17,5} - 1,7; 2,5 \right\} = 2,5$$

Para os parafusos de extremidade teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{e_1}{3 d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{40}{3 \times 17,5}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 0,76$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 0,76 \times 504,2 \times 16,0 \times 15,6 = 239,71 \text{ kN}$$

Para os parafusos interiores teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{80}{3 \times 17,5} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 1,0 \times 504,2 \times 16,0 \times 15,6 = 314,62 \text{ kN}$$

Sendo assim, a resistência ao esmagamento nos oito furos será:

$$F_{b,Rd} = 4 \times 239,71 + 4 \times 314,62 = 2217,33 \text{ kN}$$

A resistência do perfil exterior à tracção, $N_{t,Rd}$, é:

$$N_{t,Rd} = \text{menor}\{N_{pL,Rd} = A \cdot f_y; N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u\} \\ = \text{menor}\{18,85 \times 354,9; 0,9 \times 64,54 \times 504,2\} = 668,99 \text{ kN}$$

A.2.2 – Cálculo da resistência do perfil interior

Os valores mínimos relativos aos afastamentos entre parafusos são:

$$e_1 = e_2 = 1,2 \cdot d_0 = 1,2 \times 17,5 = 21,00 \text{ mm}$$

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 = 2,2 \times 17,5 = 38,50 \text{ mm}$$

p_2 não existe uma vez que o elemento é seccionado.

Os valores dos afastamentos são os apresentados abaixo, cumprindo os valores calculados anteriormente:

$$e_1 = 30 \text{ mm}, \quad e_2 = 27,65 \text{ mm}, \quad p_1 = 80 \text{ mm}$$

$$A_{net} = A - n \cdot t \cdot d = 8,46 - 1 \times 2,0 \times 1,6 = 5,26 \text{ cm}^2$$

A resistência ao esmagamento para um parafuso é dada por:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t$$

Sendo o coeficiente $\alpha_b = \text{menor}\left\{\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right\}$ e $k_1 = \text{menor}\left\{1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\}$, uma vez que perpendicularmente à transmissão de esforços todos os parafusos são interiores.

$$k_1 = 2,5$$

Para os parafusos de extremidade teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{e_1}{3 d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{21}{3 \times 17,5}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 0,57$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 0,57 \times 504,2 \times 16,0 \times 20,0 = 230,49 \text{ kN}$$

Para os parafusos interiores teremos:

$$\alpha_b = \text{menor} \left\{ \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \text{menor} \left\{ \frac{80}{3 \times 17,5} - \frac{1}{4}; \frac{1000}{504,2}; 1,0 \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \times 1,0 \times 504,2 \times 16,0 \times 20,0 = 403,36 \text{ kN}$$

Sendo assim, a resistência ao esmagamento nos oito furos será:

$$F_{b,Rd} = 4 \times 230,49 + 4 \times 403,36 = 2535,41 \text{ kN}$$

A resistência do perfil interior à tracção, $N_{t,Rd}$, é:

$$N_{t,Rd} = \text{menor} \{ N_{pl,Rd} = A \cdot f_y; N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u \} \\ = \text{menor} \{ 4 \times 8,46 \times 354,9; 0,9 \times 4 \times 5,26 \times 504,2 \} = 954,74 \text{ kN}$$

A.2.3 – Cálculo da resistência dos parafusos

A resistência ao corte, $F_{v,Rd}$, para um parafuso é dada pela seguinte expressão:

$$F_{v,Rd} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s = 0,5 \times 1000 \times 157 = 78,50 \text{ kN}$$

A resistência total dada pelos 8 parafusos será 628,00 kN.