



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

Análise Numérica de Ligações de Emenda Aparafusadas Inovadoras entre Perfis de Secção Tubular

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

Autor

Joana Carolina Santos Pedrosa Fernandes

Orientador

Rui António Duarte Simões

Sandra Filomena Silva Jordão Alves

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

Coimbra, Fevereiro, 2016

“Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

É com enorme alegria que expresso o meu mais profundo agradecimento a todos aqueles que com o seu apoio e incentivo tornaram a realização desta dissertação possível.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Rui Simões e Professora Sandra Jordão, pela partilha de saber e valiosas contribuições, pela disponibilidade e acompanhamento que sempre demonstraram e sobretudo pela firmeza com que sempre acreditaram no meu trabalho.

Agradeço à minha mãe, ao meu pai, ao meu irmão e à minha avó, que sempre me apoiaram incondicionalmente e sempre me proporcionaram o melhor. Ao meu avô, que partiu cedo de mais, dedico esta dissertação.

Ao Tozé em especial, as palavras que possa aqui escrever nunca serão dignas de todo o amor, carinho, confiança e força demonstrados.

Às minhas amigas Carolina e Diana, por terem sido verdadeiras companheiras de luta, partilhando comigo momentos de cansaço e frustração, mas também muitos momentos de festa e alegria.

Aos meus amigos, os Melhores Amigos, que sempre compreenderam as constantes ausências e me incentivaram a dar o melhor de mim.

RESUMO

Em construção metálica, as soluções com perfis tubulares apresentam inúmeras vantagens, ao permitirem associar a eficácia, leveza e sustentabilidade das estruturas em aço, com a vertente arquitetónica que é possível explorar graças à geometria destes perfis.

Uma das vantagens das estruturas metálicas é a possibilidade de produzir em fábrica os diversos elementos estruturais, sendo muitas vezes necessário segmentar estes elementos, prevendo ligações de emenda, para permitir o seu transporte e montagem no local da obra. As configurações de ligações de emenda entre perfis de secção tubular mais usadas atualmente são bastante grosseiras e pouco estéticas (aparafusadas) ou onerosas (soldadas).

O estudo das ligações entre os elementos estruturais é uma das mais importantes fases da conceção de um projeto de estruturas metálicas. Uma vez que as ligações são componentes condicionantes no comportamento da estrutura, por garantirem a transmissão de esforços entre os elementos estruturais, o seu dimensionamento afeta largamente vários aspetos do projeto, como sejam económicos, de segurança e até mesmo estéticos.

Com este trabalho pretende-se elaborar um estudo numérico de ligações de emenda aparafusadas, entre perfis de secção tubular, sujeitas a esforço axial, utilizando configurações inovadoras, que possam ser uma alternativa economicamente viável e esteticamente apelativa às soluções convencionais. Os desenvolvimentos e conclusões agora apresentados são a etapa final de um vasto estudo de otimização estrutural que incluiu várias etapas com forte componente experimental.

A principal tarefa desta dissertação consiste no desenvolvimento de modelos numéricos por elementos finitos, devidamente calibrados através dos resultados dos ensaios experimentais realizados nas etapas anteriores do estudo. Estes modelos numéricos serão a base para a realização um estudo paramétrico de caracterização do comportamento estrutural da ligação. O objetivo fundamental desta dissertação é a validação dos modelos de cálculo e de dimensionamento atualmente preconizados pelo Eurocódigo 3 – Parte 1-8 e o estabelecimento de limites geométricos que assegurem um adequado desempenho mecânico da ligação em condições reais.

ABSTRACT

Tubular steel structures present a large number of advantages as they combine the efficiency, elegance and sustainability that is characteristic of steel structures with the architectural value that is possible to explore due to the geometry of these hollow sections.

One of the major benefits of steel structures is the possibility of factory production of the structural elements, being sometimes necessary to segment these elements and predict splice connections, assessing their transportation and assembly at the construction site. The most common configurations of hollow sections splice connections are coarse and unaesthetic (bolted type) or too expensive (welded type).

The study of connections between structural elements is one of the most important parts of the conception of a steel structure project. Given the fact that connections are critical components for the structure behavior, as they transfer the stresses to the structural frame, their design deeply affects several aspects of the project, such as economics, safety and aesthetics.

With the present dissertation it is intended to elaborate a numeric study of bolted splice connections, between circular hollow sections, submitted to axial stress, using innovating configurations that can be an economically and aesthetically appealing alternative to the conventional solutions. The developments and conclusions now present are the last stage of a comprehensive structural optimization study, which included several stages with strong experimental component.

The main task of this dissertation consists in the development of numeric models of finite elements, calibrated accordingly to experimental results of previous dissertations. These models will be the groundwork to a parametric study of characterization of the connection's structural behavior. The fundamental purpose of this dissertation is the validation of the formulations given by the Eurocode 3 - Part 1-8 and the establishment of geometric boundaries that can assure the mechanical behavior of the connection in real conditions.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Estruturas metálicas com perfis tubulares	1
1.2.1	Características e aplicações	1
1.2.2	Perfis tubulares circulares	3
1.3	Objetivo do trabalho	4
1.4	Estruturação da dissertação	6
2	ESTADO DA ARTE	8
2.1	Desenvolvimento histórico	8
2.2	Manuais de projeto e documentos regulamentares	8
2.3	Soluções de emenda em perfis tubulares circulares	10
2.3.1	Ligações em estruturas metálicas	10
2.3.2	Ligação com sistemas <i>Blind Bolting</i>	11
2.3.3	Ligação com chapas de topo	13
2.3.4	Ligação com chapas laterais	13
2.3.5	Ligação por atrito com parafusos de alta resistência	14
2.4	Estudos e publicações	15
2.5	Dissertações anteriores	17
3	ANÁLISE NUMÉRICA	22
3.1	Introdução	22
3.2	Ensaio experimentais	23
3.2.1	Configuração da ligação e resultados	23
3.2.2	Caracterização do material	27
3.3	Descrição do modelo numérico	27
3.3.1	Geometria do modelo	27
3.3.2	Propriedades dos materiais	30
3.3.3	Tipo de elementos	33
3.3.4	Discretização da malha	37
3.3.5	Condições de apoio e carregamento	40
3.3.6	Interação e contacto	41
3.3.7	Tipo de análise	45
3.4	Análise dos resultados	45

4	ESTUDO PARAMÉTRICO	52
4.1	Introdução	52
4.2	Análise dos resultados	53
5	AVALIAÇÃO REGULAMENTAR.....	57
5.1	Introdução	57
5.2	Formulação regulamentar	58
5.3	Comparação de resultados	61
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	63
6.1	Conclusões	63
6.2	Desenvolvimentos futuros	64
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos, as estruturas metálicas têm vindo a ganhar cada vez mais relevo no panorama da construção e da arquitetura. Este facto deve-se em grande medida às propriedades físicas e mecânicas do aço, que se assume como um material de grande relevância para uso estrutural, graças à sua elevada resistência, durabilidade e versatilidade.

Uma das vantagens da utilização de estruturas em aço é a possibilidade de pré-fabricação e posterior montagem em obra dos elementos estruturais, o que permite uma execução mais célere da obra, acentuada redução de custos e melhor controlo de qualidade. Do ponto de vista estrutural, as estruturas metálicas apresentam elevada ductilidade, elevada resistência sísmica e capacidade de vencer grandes vãos, o que resulta em soluções bastante esbeltas, leves e com grande potencial estético.

1.2 Estruturas metálicas com perfis tubulares

1.2.1 Características e aplicações

Em construção metálica uma das fases determinantes do dimensionamento de uma estrutura é a escolha dos perfis adequados aos esforços atuantes e às características da estrutura. Para além da componente técnica e económica, a escolha dos perfis tem ainda uma grande importância do ponto de vista arquitetónico, uma vez que a geometria dos perfis influencia e pode ser condicionante para a estética do edifício.

Entre as várias opções disponíveis no mercado existem dois grandes grupos: os perfis abertos e os perfis tubulares, que oferecem diferentes soluções de acordo com as suas características geométricas e mecânicas, custos de fabrico, montagem e manutenção. Genericamente face aos perfis abertos, os perfis tubulares apresentam as seguintes vantagens:

- Elevada resistência a esforços de compressão, torção, tração e efeitos combinados;
- Para igual valor de resistência, apresentam menor quantidade de material;
- Redução significativa dos desperdícios na produção;
- Menor área exposta, o que leva a uma redução dos custos de pintura, proteção ao fogo e economiza e facilita o processo de manutenção;

- Possibilidade de atingir vãos livres maiores;
- Possibilidade de utilização e aproveitamento do seu interior, podendo este ser preenchido com betão ou água, obtendo-se assim resistência adicional a esforços de compressão e proteção contra fogo, respetivamente;
- Melhor desempenho aerodinâmico;
- Grande potencial estético.

Os perfis tubulares podem ser desvantajosos em relação às secções abertas considerando que o seu custo de produção é ligeiramente mais elevado e a sua geometria fechada dificulta a conceção de ligações.

Quanto à aplicação dos perfis tubulares, estes podem ser usados em colunas, vigas, treliças e estacas de fundação. Estão presentes em estruturas de grande relevância e envergadura como aeroportos e outros centros modais de transporte (Figura 1.1 a) e b)), instalações desportivas e de exposições (Figura 1.1 c) e d)), pontes, torres de transmissão e telecomunicações, estruturas *offshore*, estruturas de aproveitamento eólico, máquinas e equipamentos de construção.



a) Aeroporto de Hamburgo, Alemanha



b) Cobertura na Estação de King's Cross, Londres (Quintin Lake@, 2015)



c) Estádio de Wembley, Londres (V&M do Brasil, 2008)



d) Pavilhão de Exposições em Leipzig, Alemanha (V&M do Brasil, 2008)

Figura 1.1 – Alguns exemplos de aplicação de perfis tubulares

Outra confirmação do valor de mercado dos perfis tubulares é o crescimento na produção e venda deste tipo de secções, registado no gráfico da Figura 1.2, para perfis tubulares laminados a quente pela norma EN10210-1 (CEN, 2006a) e perfis tubulares enformados a frio pela norma EN10219-1 (CEN, 2006b).

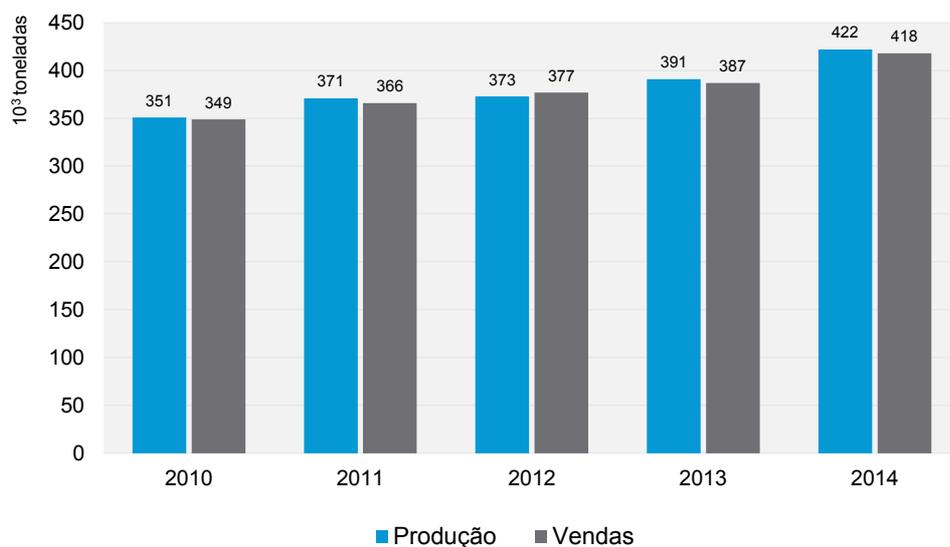


Figura 1.2 – Produção e venda anual de perfis tubulares (Dados Tata Steel)

1.2.2 Perfis tubulares circulares

Considerando que há princípios inerentes à forma, e que um objeto mediante uma determinada solicitação se comporta tendo em conta as suas características mecânicas, é seguro afirmar que esse objeto também responderá a essa solicitação de acordo com a sua geometria. Neste sentido, as secções circulares, pelas suas propriedades geométricas, destacam-se de entre os restantes perfis tubulares. Se observarmos a Natureza rapidamente identificamos exemplos naturais de perfis circulares, como os ossos ou as canas de bambu, que exibem um comportamento notável sob variados tipos de solicitações (Firmo, 2005).

Para além das vantagens da utilização de perfis tubulares já referidas, às secções tubulares circulares acrescentam-se ainda as seguintes vantagens:

- São isentas de fenómenos de instabilidade por torção e flexão-torção;
- Oferecem a mesma resistência à flexão em torno de qualquer eixo de inércia;
- Apresentam um menor perímetro para um maior conteúdo;
- A sua forma com superfície contínua e sem arestas confere melhor comportamento aerodinâmico e menor impacto visual.

1.3 Objetivo do trabalho

Apesar de todas as vantagens reconhecidas às estruturas tubulares, a sua conceção e projeto são largamente condicionados pelas ligações, uma vez que o facto de os perfis tubulares serem fechados e não existir acesso ao seu interior, impossibilita o uso de ligações aparafusadas correntes. As soluções aparafusadas alternativas revelam-se muitas vezes inadequadas por questões estéticas ou estruturais e as soluções soldadas tendem a ser evitadas por acarretarem maiores custos económicos e dificuldades técnicas. As ligações, como responsáveis pela transmissão de esforços, são de extrema importância no comportamento da estrutura e desta forma, sentiu-se a necessidade de estudar uma configuração de uma ligação de emenda entre perfis tubulares que aliasse desempenho estrutural, com facilidade de execução, e com capacidade estética.

Esta dissertação surge no âmbito de um estudo de ligações inovadoras entre perfis de secção tubular mais abrangente, apoiada nos desenvolvimentos e conclusões alcançados nas seguintes dissertações:

- Ligações em Estruturas Trianguladas com Perfis Tubulares de Secção Oca (Dias, 2011);
- Análise de Ligações em Perfis Tubulares com Parafusos de Cabeça Embutida (Soares, 2012);
- Avaliação Experimental de Configurações Inovadoras Para a Execução de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular (Carvalho, 2012);
- Configurações Inovadoras de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular (Freitas, 2013);
- Study of splice bolted connections in truss steel structures with hollow sections (Silva, 2014);
- Análise Experimental de Ligações de Emenda Aparafusadas Inovadoras entre Perfis de Secção Tubular (Vasconcelos, 2015).

Nas dissertações anteriores foram ensaiadas várias configurações, variando as características geométricas dos diferentes componentes da ligação, procurando compreender o seu funcionamento e estabelecer uma configuração final que permitisse atingir o resultado desejado: um comportamento estrutural que possa ser previsto pela regulamentação existente para ligações ao corte convencionais e um *design* discreto que seja uma vantagem indiscutível.

A definição da geometria da ligação agora proposta foi um processo iterativo que resultou numa configuração em que a emenda do perfil de secção tubular é feita com recurso a dois troços de um tubo mecânico, que são soldados concentricamente ao perfil, como se observa na Figura 1.3.

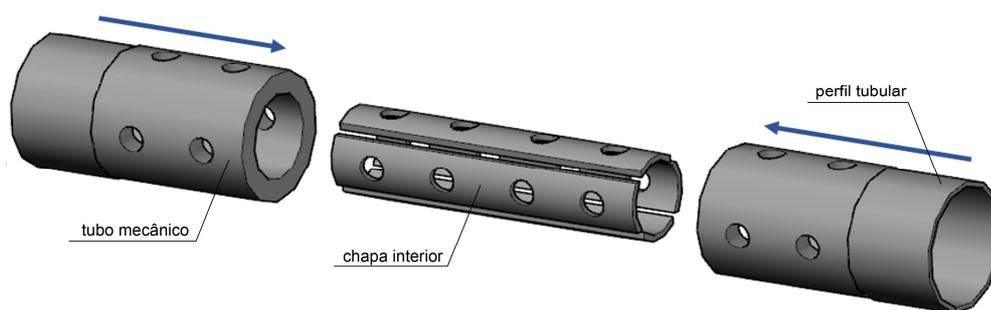


Figura 1.3 – Geometria da ligação (Adaptado de Silva, 2014)

No tubo mecânico são feitos furos escareados, com o objetivo de alojar a cabeça do parafuso, dando uma sensação de continuidade da zona de ligação, tornando-a quase impercetível, como se pode observar na Figura 1.4.



Figura 1.4 – Pormenor do parafuso da ligação (Vasconcelos, 2015)

A configuração de aspeto discreto dos parafusos, para além da sua óbvia vantagem estética, permite um aumento da área de contacto dos parafusos com o tubo mecânico, o que oferece uma melhoria na transmissão de esforços, aumentando a resistência da secção ao esmagamento. Esta configuração torna também o parafuso menos exposto aos elementos, o que diminui a probabilidade de corrosão.

O aparafusamento é feito através dos furos roscados das chapas interiores, que desta forma desempenham um papel semelhante ao de uma porca numa ligação aparafusada convencional. Esta particularidade do aparafusamento da ligação coloca um desafio estrutural, uma vez que a ausência de porca permite que haja rotação significativa do parafuso, alterando o seu comportamento. O parafuso passa a estar sujeito a forças de tração, para além das forças de corte, o que invalida a aplicação das formulações do Eurocódigo para ligações ao corte. Este problema foi minimizado com a escolha do tipo e diâmetro dos parafusos, e através da espessura adotada para o tubo mecânico e chapa interior.

Assim sendo, o objetivo da presente dissertação é a caracterização e otimização do comportamento de uma ligação de emenda aparafusada entre perfis de secção tubular circular, sujeita a esforço axial, que se distingue das atuais soluções aparafusadas pelo seu valor estético.

Para tal, será inicialmente concebido um modelo numérico em ambiente computacional, calibrado através dos resultados experimentais apresentados por João Silva (2014) e por Bruno Vasconcelos (2015).

Concluído este passo, será feito um estudo paramétrico onde se prevê variar a espessura do tubo mecânico, para que se possam estabelecer limites geométricos que assegurem o desempenho mecânico da ligação em condições reais.

Por último, para a ligação proposta neste estudo, pretende-se verificar a aplicabilidade dos modelos de cálculo para ligações ao corte convencionais, previstos no Eurocódigo 3 – Parte 1-8.

1.4 Estruturação da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, cujo conteúdo se encontra descrito resumidamente nos seguintes parágrafos:

No **Capítulo 1 - Introdução** é apresentado um breve enquadramento da importância das estruturas metálicas, com o intuito de firmar o interesse no desenvolvimento de investigações nesta área. Neste sentido apresentam-se as vantagens da utilização de perfis tubulares circulares e também se esclarece o âmbito e o objetivo da elaboração da presente dissertação.

No **Capítulo 2 - Estado da Arte** começa-se por fazer referência aos desenvolvimentos históricos mais relevantes para o início e desenvolvimento da construção metálica. É dado particular destaque aos documentos normativos e manuais de dimensionamento relacionados com perfis tubulares e aos estudos e publicações de interesse para este trabalho. É feita uma breve descrição dos vários tipos de ligações de emenda aparafusadas correntemente utilizadas e conclui-se este capítulo com o resumo dos desenvolvimentos alcançados pelas dissertações anteriores.

No **Capítulo 3 - Avaliação Numérica** é apresentado um resumo das configurações e resultados dos ensaios experimentais das dissertações que precederam este trabalho, como base para a caracterização e calibração dos modelos numéricos. Será feita uma descrição alargada das várias etapas da modelação numérica, concluindo com a apresentação dos resultados numéricos e respetiva crítica e comparação com os resultados experimentais.

No **Capítulo 4 - Estudo Paramétrico** será feita uma abordagem geral sobre o âmbito do estudo e apresentadas as configurações resultantes da variação paramétrica da espessura do tubo. Serão demonstrados os resultados para todos modelos testados e as conclusões retiradas sobre a influência da espessura do tubo no comportamento da ligação.

No **Capítulo 5 - Avaliação Analítica** serão efetuados cálculos analíticos para a resistência da ligação, usando as formulações do Eurocódigo 3 - Parte 1-8 para ligações aparafusadas ao corte convencionais. Com o intuito de validar a segurança da ligação, os resultados obtidos analiticamente serão comparados com os resultados numéricos e experimentais, anteriormente apresentados.

No **Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros** serão apresentadas as conclusões alcançadas através deste estudo e sugestões para desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Desenvolvimento histórico

A exploração do minério de ferro pelo Homem remonta a 1770 A.C., a sul do Cáucaso, onde foram encontrados vestígios de um forno primitivo, onde era aquecida uma mistura do minério com carvão vegetal para fabricar armas e pequenos utensílios. Mais tarde, o ferro começou a ser utilizado em pequena escala na construção, como reforço estrutural de alguns elementos como arcos ou colunas, mas só com a Revolução Industrial do séc. XVIII o ferro teve grande projeção como material de construção, em parte graças ao trabalho desenvolvido pelo inglês Abraham Darby I, que inventou e desenvolveu um método de produção de ferro em larga escala.

Em 1855 Henry Bessemer inventou e patenteou um processo de produção de aço, popularizado como o Processo de Bessemer, que permitiu a obtenção de um produto mais barato e de maior qualidade. Apesar deste grande desenvolvimento, o aço não tinha propriedades que permitissem o seu uso estrutural e era utilizado principalmente pela indústria dos caminhos-de-ferro e pela indústria naval (Jackson, 1998). Apenas em finais de séc. XIX, com as melhorias introduzidas pelo processo de Siemens-Martin, o aço começou a ser utilizado na produção de perfis estruturais e como reforço do betão.

Já no campo das estruturas tubulares, foi construída em 1890, na Escócia, a ponte do estuário do rio Forth, com um vão de 521 metros, utilizando perfis tubulares executados com chapas laminadas aparafusadas. Os desenvolvimentos tecnológicos da primeira metade do séc. XX levaram a que nos anos 50 os problemas de produção deste tipo de perfis fossem ultrapassados, restando os problemas relacionados com o dimensionamento e resistência das ligações entre este tipo de perfis (Wardenier *et al*, 2010).

2.2 Manuais de projeto e documentos regulamentares

Sendo clara a necessidade de maior compreensão sobre o funcionamento e resistência das ligações entre perfis tubulares circulares, e sendo escassos os estudos ou informação quanto a este assunto, o alemão W. Jamm apresenta em 1951 o primeiro conjunto de recomendações preliminares sobre o cálculo de ligações entre perfis tubulares circulares em estruturas treliçadas.

Em 1962 é criado o CIDECT – Comité International pour le Developpement et l'Étude de la Construction Tubulaire, uma associação internacional composta pelos principais fabricantes de perfis tubulares, com o objetivo de reunir esforços no campo da pesquisa e aplicação deste tipo de elementos a nível mundial, refletindo-se os frutos deste trabalho na formulação de diversos documentos normativos e de auxílio ao projeto.

Em Inglaterra, a crescente procura por este tipo de solução estrutural leva ao surgimento de novos estudos experimentais e teóricos, dos quais resulta um novo guia de recomendações de projeto, apresentado em 1970 por Eastwood e Wood (Packer e Henderson, 1997). No ano seguinte, o primeiro manual de ligações para perfis tubulares é publicado no Canadá pela Stelco. Em 1973 investigadores holandeses conjuntamente com um grupo de trabalho do CIDECT realizam um extenso programa experimental com o objetivo de produzir recomendações para ligações combinadas entre diferentes tipos de secções tubulares (Wardenier, 1982). No final da década de 70, em 1977, o CISC – Canadian Institute of Steel Construction, publica o manual “Limit States Design Steel Manual” (Packer e Henderson, 1997).

Os anos 80 são um período de consolidação de conhecimento obtido pelas pesquisas levadas a cabo pelos vários grupos de trabalho a nível mundial. Destaca-se a publicação “Hollow Section Joints” (Wardenier, 1982), onde é apresentado um atualizado “estado da arte” sobre ligações de secções tubulares.

Na década de 90 entra-se numa Era de desenvolvimento tecnológico e informático, que imprime mudanças no tipo de estudos e de análises realizadas. Procuram-se assim novas formulações, mais claras e precisas, e desta vontade surgem os “Design Guides” do CIDECT e o manual “Hollow Structural Section: Connection and Trusses – a Design Guide”, do CISC (Packer e Henderson, 1997).

Na década de 1970, a União Europeia, então designada por C.E.E., firmou um programa de ação na área da construção, visando a uniformização das normas e regras regulamentares e a eliminação de entraves técnicos no comércio de serviços e produtos neste setor. Este programa materializou-se nos designados Eurocódigos, que foram publicados durante a década de 90. O regulamento respeitante às estruturas em aço designa-se por Eurocódigo 3 e está dividido em 6 partes. A parte 1, designada por “Regras gerais e regras para edifícios”, é constituída por 12 partes, das quais se destaca, no âmbito desta dissertação, a parte 8, que diz respeito ao projeto de ligações (CEN, 2005a).

2.3 Soluções de emenda em perfis tubulares circulares

2.3.1 Ligações em estruturas metálicas

As ligações consistem num conjunto de componentes localizados nos pontos de concorrência entre dois ou mais elementos estruturais, responsáveis pela transmissão de esforços e neste sentido condicionantes para o comportamento da estrutura. O estudo destes componentes é substancialmente mais complexo que o dos restantes elementos e a discrepância entre a análise e o comportamento real das ligações faz com que o seu dimensionamento mereça especial atenção nas várias fases de projeto (Santha Kumar e Satish Kumar, 2010). As ligações entre elementos estruturais em aço podem ser agrupadas como sendo ligações rebitadas, ligações soldadas ou ligações aparafusadas.

As ligações rebitadas, muito utilizadas no passado, foram gradualmente substituídas por ligações aparafusadas devido à baixa resistência da ligação e aos altos custos de instalação. Quanto às ligações soldadas, estas oferecem a vantagem de não ser preciso furação dos elementos, mas apresentam uma clara desvantagem face a cargas cíclicas, pois os fenómenos de fadiga podem induzir a fissuração da ligação. Outra desvantagem associada às ligações soldadas é a sua dificuldade de execução, que requer mão-de-obra especializada, e é, comparativamente com as outras soluções, mais cara e mais morosa (Santha Kumar e Satish Kumar, 2010). Desta forma, as ligações aparafusadas são atualmente a solução mais utilizada pelas suas diversas vantagens tais como fácil inspeção e reparação, fabrico e montagem em obra de forma mais simples e menos suscetível a erros, execução mais económica em comparação com ligações soldadas e melhor comportamento à fadiga. Quanto ao comportamento das ligações aparafusadas, estas podem ser classificadas de acordo com os esforços a que estão sujeitos os parafusos como:

- Ligações resistentes ao corte;
- Ligações pré-esforçadas;
- Ligações resistentes à tração;
- Ligações resistentes ao corte com tração.

Para cada tipo de ligação apresentado, dependendo de qual seja o seu componente mais fraco, podem ocorrer um ou mais dos seguintes modos de rotura:

- Rotura por corte longitudinal da chapa;
- Rotura por esmagamento da chapa;
- Rotura à tração da chapa;
- Rotura por corte do parafuso;
- Rotura em bloco.

Dos vários tipos de ligação que existem, as que resultam da união de várias partes de um mesmo elemento estrutural são denominadas ligações de emenda. São previstas em projeto pois muitas vezes as dimensões dos elementos impossibilitam ou dificultam e encarecem o processo de transporte. Desta forma, ao serem previamente consideradas, permitem que se produza em fábrica o elemento desejado em vários módulos, para serem posteriormente montados em obra. Neste último ponto, as ligações de emenda aparafusadas são claramente mais vantajosas em relação aos outros tipos de ligação existentes. Feita uma abordagem geral sobre ligações aparafusadas, nas seguintes subsecções apresentam-se, de forma mais detalhada, algumas soluções correntes deste tipo de ligação em perfis tubulares.

2.3.2 Ligação com sistemas *Blind Bolting*

Os parafusos na sua forma mais comum apresentam diversas geometrias e formas de aperto, de acordo com o propósito da sua utilização. No entanto, no caso particular dos perfis tubulares, a utilização do sistema comum parafuso-rosca torna-se inviável uma vez que, sendo a secção geometricamente fechada, o aperto da porca fica impedido. Para contornar este problema surgiram os sistemas de *Blind Bolting*, que recorrem a parafusos ou sistemas especiais para rosca furos ou para permitir a ancoragem do parafuso, tais como os ilustrados nas Figuras 2.1 a 2.5 (Dutta *et al*, 1998).

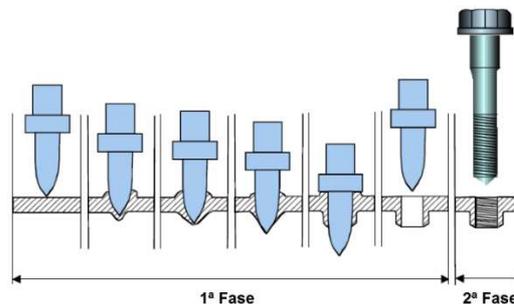
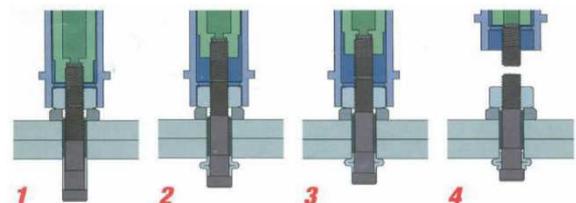


Figura 2.1 – Sistema *Flowdrill* (Adaptado de Wardenier *et al*, 2010)



a) Componentes do sistema



b) Fases de execução do sistema

Figura 2.2 - Sistema *Huck Ultra-Twist* (Soares, 2011)

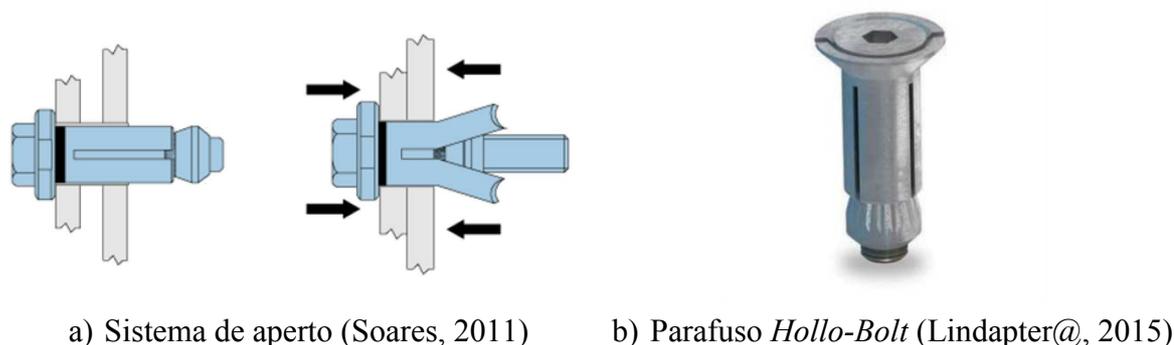


Figura 2.3 – Sistema *Lindapter Hollo-Bolt*

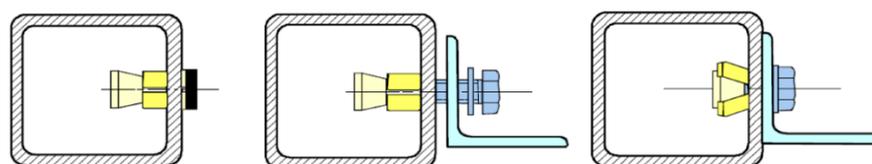


Figura 2.4 – Sistema *Lindapter Hollo-Fast* (Wardenier *et al*, 2010)

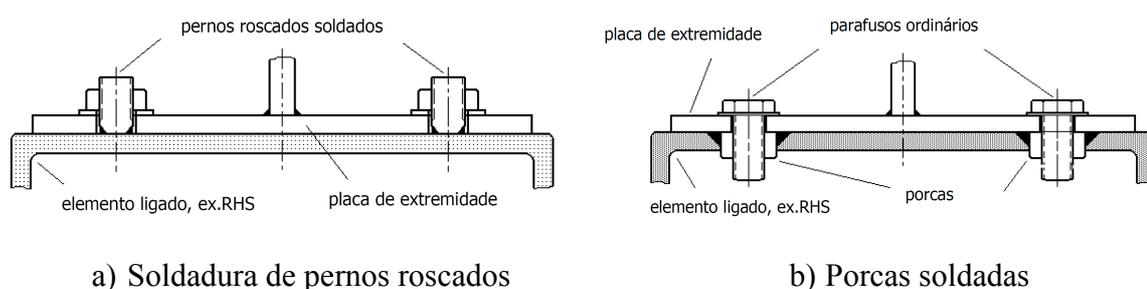


Figura 2.5 – Outros Sistemas (Simões da Silva e Santiago, 2003)

Ainda que estes sistemas estejam disponíveis no mercado há largos anos e sejam uma alternativa ao sistema de aperto comum, os poucos estudos existentes sobre o seu comportamento e resistência estrutural fazem com que estes sistemas sejam utilizados essencialmente para fixação de elementos secundários, como perfis enformados a frio ou painéis de revestimento.

2.3.3 Ligação com chapas de topo

Atualmente a solução de ligação de emenda para perfis tubulares mais usada é a ligação de chapa de topo. Isto deve-se sobretudo à sua fácil execução e aos vários estudos existentes. Esta ligação é executada soldando chapas circulares, de diâmetro superior ao diâmetro dos tubos, às extremidades que se pretendem unir e posteriormente proceder ao seu aparafusamento, tal como mostra a Figura 2.6.

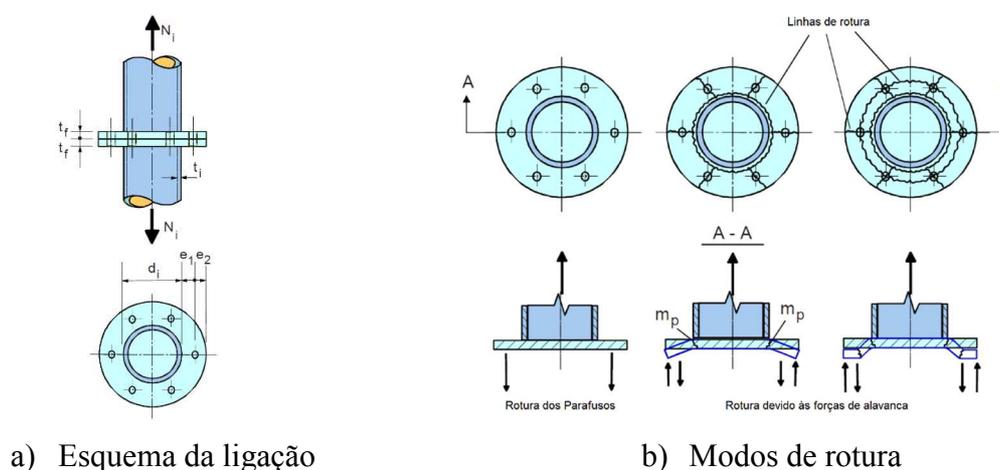


Figura 2.6 – Ligação de chapa de topo (Adaptado de Wardenier *et al*, 2010)

Quando sujeita a esforços axiais de tração, a resistência da ligação depende da resistência à tração dos parafusos, e da resistência das chapas ao punçoamento e à flexão. Quanto à rotura da ligação, os dois modos condicionantes são a rotura dos parafusos e a rotura da chapa devido às forças dos parafusos combinadas em forças de alavanca.

2.3.4 Ligação com chapas laterais

A ligação com chapas laterais é conseguida soldando longitudinalmente quatro, seis ou oito abas no topo dos tubos a ligar, que são posteriormente aparafusadas recorrendo a uma outra chapa, comum às duas extremidades dos tubos, tal como ilustrado pela Figura 2.7.

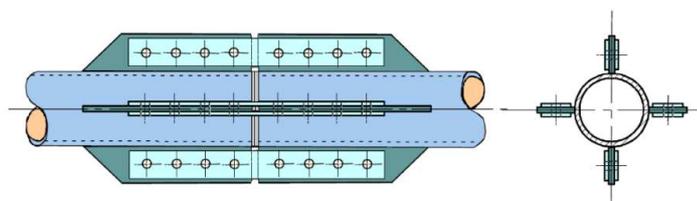


Figura 2.7 – Esquema da ligação com chapas laterais (Wardenier *et al*, 2010)

Esta ligação, de geometria pouco apelativa, apresenta alguma complexidade de execução e está facilmente sujeita a fenómenos de corrosão, fatores que a tornam pouco utilizada em projeto. Esta ligação pode ser no entanto apropriada para elementos de grandes dimensões, sujeitos a cargas elevadas (Dutta *et al*, 1998). Quanto à sua resistência, os modos de rotura possíveis são a rotura por corte dos parafusos, o esmagamento das chapas, a rotura por tração das chapas e a rotura da soldadura das abas longitudinais (Carvalho, 2012).

2.3.5 Ligação por atrito com parafusos de alta resistência

Uma das aplicações mais correntes de ligações entre perfis tubulares surge na construção de torres de aproveitamento eólico. A dimensão destas estruturas, que podem atingir os 200 metros de altura, faz com que seja indispensável a fabricação por módulos e posterior montagem *in-situ*, o que origina a necessidade de prever ligações de emenda destes elementos.

Neste contexto, foi desenvolvido o projeto HISTWIN, financiado pela Comissão Europeia, cujo objetivo foi melhorar a competitividade dos sistemas eólicos, através do desenvolvimento de ligações de emenda inovadoras, mais simples e económicas. A ligação proposta por este projeto consiste numa ligação resistente ao escorregamento, que mobiliza o atrito entre os elementos a ligar recorrendo a parafusos pré-esforçados TCB (Tension Control Bolt), como se ilustra na Figura 2.8.

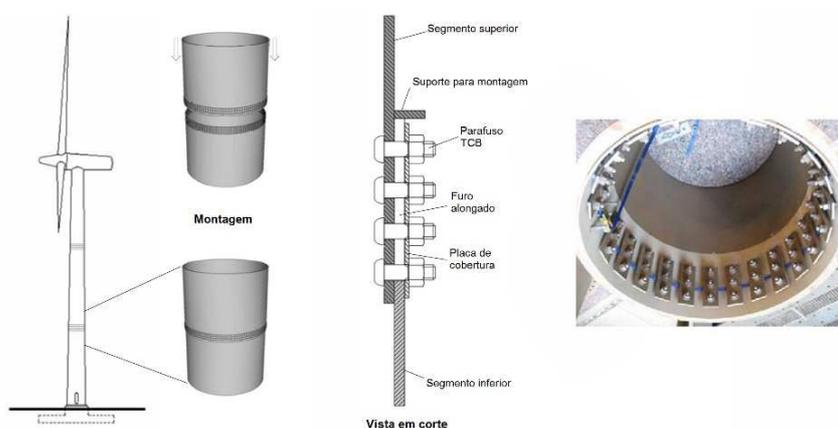


Figura 2.8 – Conceção e geometria da ligação proposta (Adaptado de HISTWIN, 2012)

As vantagens deste sistema são a redução do tempo de montagem e o aumento da segurança, uma vez que esta ligação assegura um melhor comportamento à fadiga que as típicas ligações com chapas de topo.

2.4 Estudos e publicações

Dos estudos existentes sobre modelação numérica de ligações aparafusadas, os que se apresentam nos seguintes parágrafos foram particularmente importantes na elaboração da presente dissertação.

Em 2007, Kim e outros autores (Kim *et al*, 2007) publicaram um estudo sobre análise de elementos finitos e modelação de ligações aparafusadas, no qual foram contemplados quatro modelos distintos: modelo de parafuso sólido, modelo de parafuso acoplado, modelo de parafuso aranha e modelo sem parafuso, tal como se ilustra na Figura 2.9

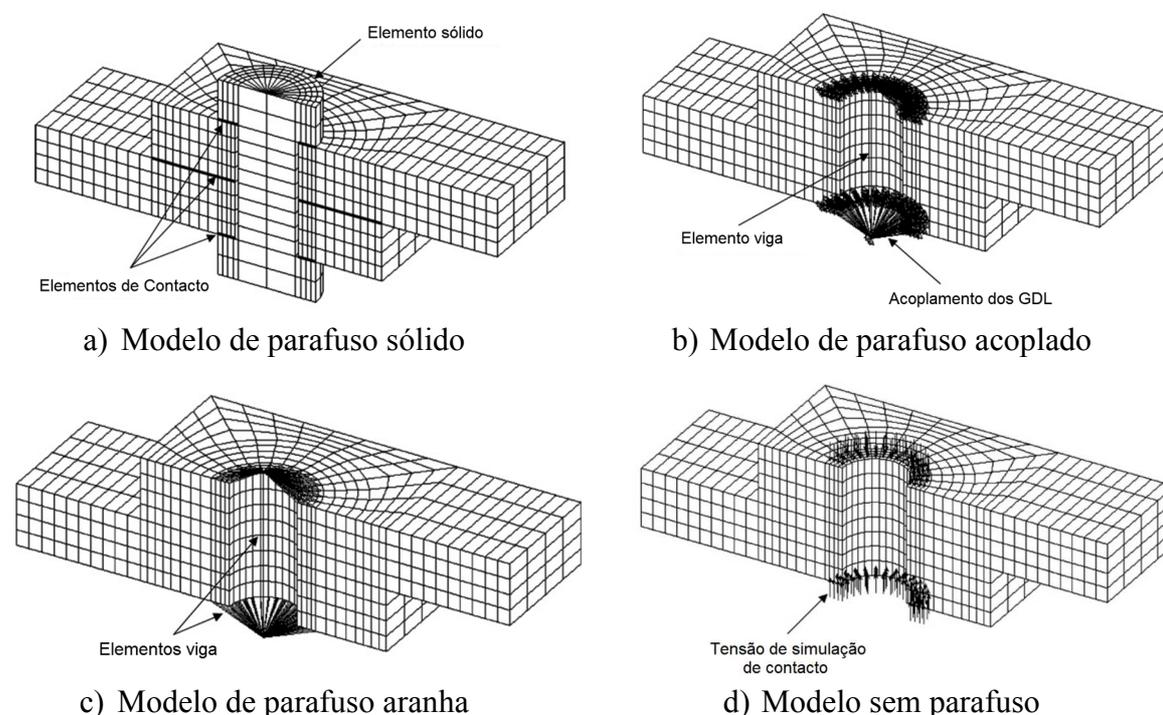


Figura 2.9 – Modelos numéricos estudados (Adaptado de Kim *et al*, 2007)

Os resultados deste estudo revelaram que o modelo de parafuso sólido oferece os resultados mais precisos para o comportamento da ligação, apesar de em termos de eficácia do modelo do ponto de vista computacional, outros modelos se tenham destacado.

Em 2009, Williams e outros autores (Williams *et al*, 2009) realizam uma análise experimental e numérica de juntas aparafusadas pré-esforçadas. Este estudo consistiu na realização de ensaios experimentais e calibração de um modelo numérico de elementos finitos, para comparação dos resultados obtidos com os modelos teóricos disponíveis. A ligação ensaiada encontra-se ilustrada na Figura 2.10.

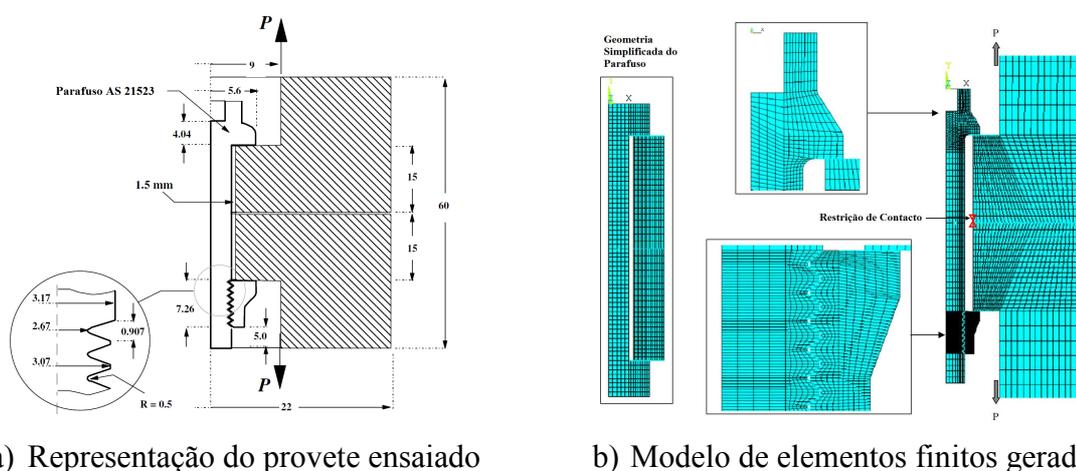


Figura 2.10 – Ligação aparafusada estudada (Adaptado de Williams *et al*, 2009)

As principais conclusões deste estudo revelaram que nos modelos computacionais em que não se incluiu a parte roscada na geometria e que usaram representações simplificadas da cabeça do parafuso e da porca, produziram bons resultados quando comparados com os valores experimentais. Ficou assim demonstrado que os métodos analíticos convencionais sobre juntas aparafusadas fornecem resultados conservativos, quanto à carga a que os parafusos são efetivamente sujeitos.

Em 2011, Vieira e outros (Vieira *et al*, 2011) apresentaram um artigo sobre análise numérica de ligações tubulares aparafusadas do tipo luva. A ligação em estudo é composta por dois tubos externos, submetidos unicamente a esforços de tração, aparafusados a um tubo interior de diâmetro inferior aos tubos exteriores. Os parafusos atravessam a totalidade dos dois tubos e são apertados com porcas, do lado exterior da ligação, tal como representado na Figura 2.11.

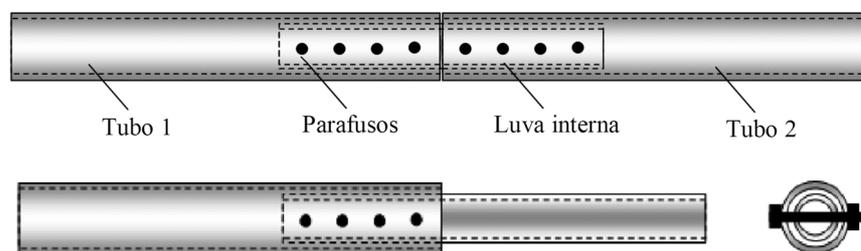


Figura 2.11 – Configuração da ligação apresentada (Adaptado de Vieira, 2014)

Nesta publicação, os autores apresentam a configuração dos modelos e os resultados obtidos, concluindo que as normas internacionais não fornecem formulações que permitam avaliar este tipo de ligação com segurança. Em 2014, Vieira apresentou novos estudos experimentais e numéricos desta ligação, complementando-os com um estudo paramétrico que visou compreender os principais modos de rotura e os fatores que influenciam a resistência da ligação. Os resultados desta investigação demonstram o bom comportamento da ligação tubular tipo luva aparafusada e a viabilidade de utilização desta ligação quando submetida à tração.

2.5 Dissertações anteriores

A realização deste trabalho apoia-se nos desenvolvimentos de um estudo mais abrangente sobre ligações de emenda entre perfis tubulares, assente nas dissertações realizadas por Ricardo Dias (2011), Tiago Soares (2012), António Carvalho (2012) e Paulo Freitas (2013) João Silva (2014) e Bruno Vasconcelos (2015).

Em 2011, Ricardo Dias iniciou o estudo de uma ligação de emenda aparafusada, entre dois perfis de secção tubular circular, sujeita apenas a esforço axial, representada na Figura 2.12.

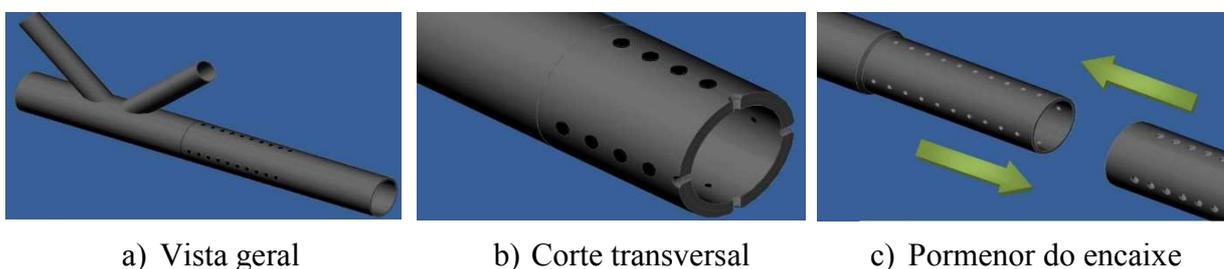
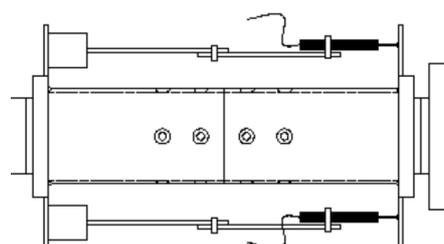


Figura 2.12 – Configuração da ligação estudada por Dias (2011)

Os ensaios experimentais foram efetuados analisando provetes planos representativos de uma fatia do tubo, tendo sido também efetuado um estudo numérico com elementos finitos. Como conclusão verificou-se que a formulação do Eurocódigo 3 – Parte 1-8 não está aferida para o cálculo de ligações com parafusos de embeber e que subestima a resistência da ligação.

Em 2012, Tiago Soares adotou uma nova configuração para a ligação de emenda entre perfis tubulares, sujeita a esforço axial, fazendo uso de um tubo mecânico no interior da secção para aparafusar as duas partes da ligação, como se ilustra na Figura 2.13.



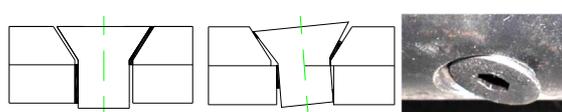
a) Esquema do Ensaio



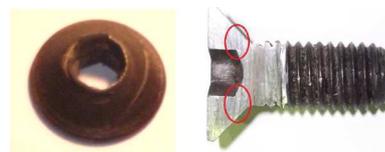
b) Provete do ensaio

Figura 2.13 – Configuração da ligação estudada por Tiago Soares (Simões *et al*, 2013)

Neste estudo foram utilizados parafusos de cabeça de embeber (CE) M10 e M8, concluindo-se que o facto do tubo interior da ligação possuir um valor de espessura próximo do valor de espessura do perfil tubular e da mesma ordem de grandeza da altura da cabeça dos parafusos, permite que haja rotação dos parafusos em torno do eixo perpendicular ao eixo do tubo, diminuindo a rigidez da ligação e provocando uma deformação localizada na parede do tubo e uma rotura do parafuso junto à base da cabeça como se observa na Figura 2.14. (Simões *et al*, 2014)



a) Efeito da rotação progressiva do parafuso



b) Corte junto à cabeça do parafuso

Figura 2.14 – Rotura do parafuso (Simões *et al*, 2014)

Ainda em 2012, António Carvalho baseando-se nas conclusões obtidas por Soares (2012) alterou a configuração da ligação de emenda, propondo o aumento da espessura e seccionamento do tubo mecânico interior (Figura 2.15).



a) Seccionamento do tubo interior



b) Provete ensaiado

Figura 2.15 – Configuração da ligação estudada por Carvalho (2012)

Estas alterações permitiram um melhor ajuste entre o tubo interior e o perfil tubular, (através do seccionamento do tubo) e um melhor ajuste dos parafusos, restringindo a rotação e flexão dos mesmos (através do aumento da espessura do tubo). A geometria da ligação manteve-se constante, fazendo-se variar apenas o tipo de parafusos ensaiados, tendo sido testados parafusos de cabeça de embeber, cabeça de tremoço e *hollo-bolt flush-fit*, como os que se ilustram na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Tipologia dos parafusos utilizados nos ensaios (Carvalho, 2012)

As curvas força-deslocamento médias obtidas para cada grupo de ensaios dos três tipos de parafusos podem ser consultadas na Figura 2.17.

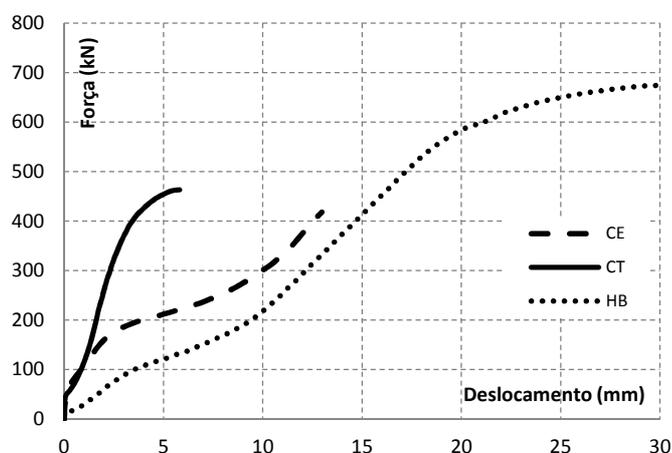


Figura 2.17 – Curvas força deslocamento (Simões *et al*, 2013)

Através das curvas apresentadas é possível concluir que as configurações com parafusos de cabeça de embeber (CE) e *hollo-bolt flush fit* (HB) apresentam uma baixa rigidez e atingem a carga máxima para valores elevados de deformação, o que acontece devido à rotação dos parafusos. No caso dos parafusos de cabeça de tremoço (CT), a rotação é bastante menor devido à sua cabeça saliente, o que permite obter a sua resistência de corte para deformações mais reduzidas. No entanto esta configuração não obedece ao critério estético estabelecido de conceber uma ligação com parafusos à face da peça.

Baseando-se nas conclusões de Carvalho (2012), Paulo Freitas realizou em 2013 um estudo numérico de ligações de emenda com duas tipologias distintas, uma com perfis tubulares circulares e a outra com perfis tubulares quadrangulares onde foram variadas a espessura e a dimensão dos perfis, a espessura das chapas interiores e o diâmetro e tipo dos parafusos. Os modelos numéricos (Figura 2.18) foram calibrados através de um ensaio experimental de uma ligação entre perfis circulares com parafusos de cabeça de tremoço M12, realizado por Carvalho (2012).

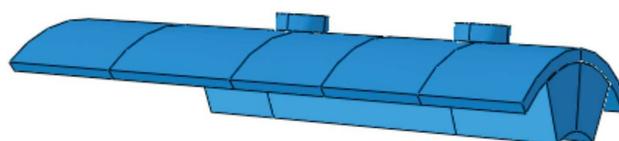


Figura 2.18 – Configuração de um modelo numérico estudado por Freitas (2013)

De uma maneira geral, concluiu-se que os resultados obtidos numericamente são próximos dos valores analíticos, o que revela que a formulação do Eurocódigo 3 – Parte 1-8 permite prever com relativa segurança o modo de rotura e resistência das ligações ao corte. A conclusão mais relevante é que para que a ligação possa funcionar como uma ligação ao corte convencional, evitando a rotação e conseqüente tração do parafuso, a componente exterior da ligação deve possuir uma espessura superior à altura do escareado da cabeça dos parafusos.

Numa seguinte iteração, realizada por João Silva (2014), alcançou-se a configuração final da ligação. As principais diferenças entre a configuração anterior foi a diminuição da espessura das secções do tubo mecânico interior (as quais se passaram a designar por chapas interiores) e a utilização de um tubo mecânico de maior espessura, soldado ao perfil tubular. Este tubo mecânico tem a função para acomodar os parafusos e assim garantir que a linha de corte dos parafusos não se situe na zona do escareado do furo, junto à cabeça dos parafusos, mas sim mais abaixo, na zona roscada. Na Figura 2.19 é possível observar a montagem parcial de uma configuração ensaio por Silva (2014).



Figura 2.19 – Configuração da ligação estudada por Silva (2014)

As configurações ensaiadas combinaram parafusos M12 e M16, de cabeça circular e cabeça de embeber, com chapas interiores de 6 mm (espessura nominal), para os modos de rotura por corte do parafuso e esmagamento da chapa. Foram ainda desenvolvidos modelos numéricos (Figura 2.20) que permitiram prever o valor da resistência da ligação e os modos de rotura, mas que em termos de rigidez e comportamento na fase plástica não se aproximaram dos resultados experimentais.

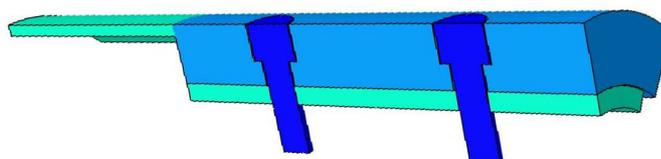


Figura 2.20 – Configuração de um modelo numérico estudado por Silva (2014)

O trabalho realizado por Bruno Vasconcelos (2015) teve por objetivo estudar uma configuração da ligação proposta que obtivesse o modo de rotura por esmagamento do perfil. Para tal, manteve-se a configuração das ligações ensaiadas por Silva (2014), aumentando-se apenas a espessura nominal das chapas interiores para 8 mm. Em ambas as dissertações, os valores de cálculo da resistência da ligação, obtidos através das formulações do Eurocódigo 3 – Parte 1-8, aproximam-se dos valores obtidos nos ensaios experimentais.

No âmbito do trabalho de Vasconcelos (2015) foram também realizados ensaios de caracterização do material constituinte do perfil tubular, das chapas interiores e dos parafusos, para conhecer com maior exatidão as propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que estas tem uma grande influência na calibração dos modelos numéricos.

Os resultados experimentais destas duas dissertações servirão de base para a realização deste trabalho e portanto serão apresentados com mais detalhe no Capítulo 3.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Introdução

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico e consequente aumento de capacidade dos sistemas informáticos levou à criação de ferramentas de análise poderosas, sendo uma delas a análise numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), que é hoje amplamente reconhecida como a forma mais expedita de obter soluções numéricas para problemas de mecânica estrutural (Coelho, 2004).

O comportamento da ligação de emenda aparafusada pode ser previsto através de simulação numérica com segurança, uma vez que se tem por base um estudo experimental que permite calibrar o modelo e garantir a sua precisão.

A modelação deste tipo de componente estrutural é um problema complexo pois requer a construção de um modelo que englobe a geometria das várias partes, as suas interações de contacto, as propriedades dos materiais e as condições de apoio e carregamento, o que torna o processo de calibração bastante minucioso e iterativo. A escolha do programa de elementos finitos a utilizar também é importante, uma vez que este deve garantir a fiabilidade dos resultados e ao mesmo tempo oferecer as ferramentas necessárias à correta modelação do problema, num ambiente adequado ao perfil do utilizador.

Para a realização desta dissertação recorreu-se ao programa *Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment)*. Este programa de simulação numérica oferece um interface intuitivo por módulos, onde cada módulo diz respeito a uma etapa da modelação. O programa permite que o modelo seja constituído por várias partes, as quais podem apresentar diferentes propriedades e discretização, e permite também definir diferentes interações de contacto, de carregamento e de apoio, entre as partes e o ambiente de modelação. O *Abaqus/CAE* possibilita a monitorização dos vários incrementos da análise e a interpretação gráfica dos resultados.

Na seguinte secção será descrita a configuração da ligação ensaiada nas etapas anteriores deste estudo e apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do material. Nas restantes secções será apresentada uma descrição pormenorizada do modelo numérico e do procedimento de calibração e os resultados obtidos através da análise numérica.

3.2 Ensaio experimentais

3.2.1 Configuração da ligação e resultados

A ligação de emenda é composta por duas partes de um perfil de secção tubular circular de espessura t_s , soldadas concentricamente a um troço de um tubo mecânico circular de maior espessura. Cada parte do tubo mecânico contém 4 alinhamentos de 2 furos, que foram executados de forma a alojarem a cabeça dos parafusos para que estes não fiquem salientes, mas sim à face do tubo. A ligação das duas partes é feita por meio de 4 chapas interiores, de espessura t_c , com 4 alinhamentos de 4 furos roscados. As chapas interiores desempenham o papel das porcas numa ligação aparafusada convencional. Para a realização do ensaio de tração foi ainda soldada uma chapa de topo ao perfil tubular. Esta chapa de topo tem uma outra chapa soldada perpendicularmente, que permite ancorar o provete na máquina de tração. Na Figura 3.1 é possível observar os componentes da ligação descritos, para uma ligação estudada por João Silva (2014) e na Figura 3.2 pode-se observar a configuração de uma ligação ensaiada por Bruno Vasconcelos (2015).



a) Chapas interiores



b) Componente externa (Perfil+Tubo)



c) Processo de montagem da ligação



d) Aspecto dos parafusos na ligação

Figura 3.1 – Componentes da ligação estudada por Silva (2014)



Figura 3.2 – Configuração de uma ligação ensaiada por Vasconcelos (2015)

A instrumentação dos modelos foi feita utilizando extensómetros de alta capacidade do tipo YFLA-5 e defletómetros com 25 mm de capacidade de medição. O ensaio foi realizado em controlo de deslocamento, com velocidade constante.

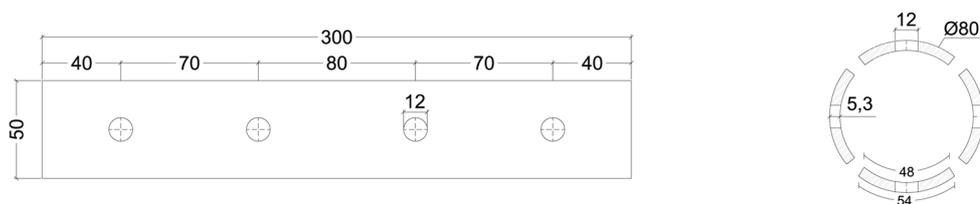
Nos ensaios de tração axial, inicialmente observou-se um aumento de carga sem aumento de deslocamento, devido ao atrito residual entre as chapas e o perfil tubular, que é gerado pelo aperto dos parafusos, apesar de a ligação não ser pré-esforçada. Depois de vencido este atrito, dá-se o ajuste entre os parafusos e os furos, e entre as chapas e o perfil, eliminando-se assim as folgas existentes entre os elementos.

Após estes ajustes, os esforços na ligação começam a propagar-se, levando a um aumento gradual das tensões nos elementos, acompanhado por um aumento de deformação. A rotura da ligação acontece durante a fase plástica, na componente ou componentes de menor resistência, podendo ocorrer por corte dos parafusos, por esmagamento da chapa, por rotura da chapa interior na secção útil reduzida devido aos furos, ou por rotura da secção bruta do perfil tubular à tração. As curvas força-deslocamento dos ensaios experimentais serão apresentadas oportunamente, na secção de análise dos resultados dos modelos numéricos.

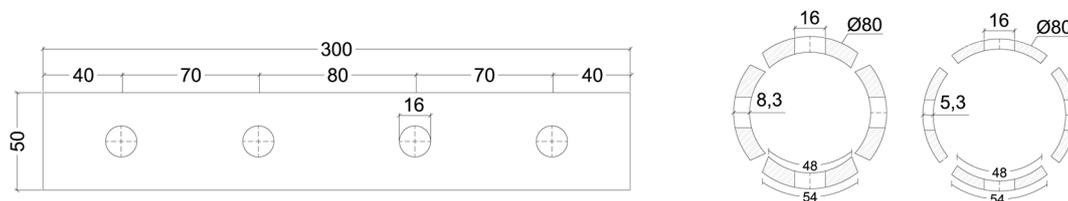
No Quadro 3.1 apresenta-se um resumo das configurações ensaiadas por Silva (2014) e Vasconcelos (2015) para obter cada um dos modos de rotura referidos. A geometria das respetivas configurações é apresentada nas Figuras 3.3, 3.4. e 3.5.

Quadro 3.1 – Resumo das configurações ensaiadas

Nome do modelo	Diâmetro do parafuso	Classe do parafuso	Tipo de parafuso	Espessura das chapas interiores	Perfil	Tubo mecânico	Modo de rotura
M12 CC t5	M12	8.8	Cabeça Circular	5,3 mm	120 mm x 4 mm	120 mm x 20 mm	Corte do parafuso
M12 CE t5			Cabeça de Embeber				
M16 CC t5	M16	10.9	Cabeça Circular	8,3 mm	120 mm x 4 mm	120 mm x 20 mm	Rotura da chapa interior
M16 CE t5			Cabeça de Embeber				
M16 CC t8	M16	10.9	Cabeça Circular	8,3 mm	120 mm x 4 mm	120 mm x 20 mm	Rotura da secção transversal do perfil
M16 CE t8			Cabeça de Embeber				

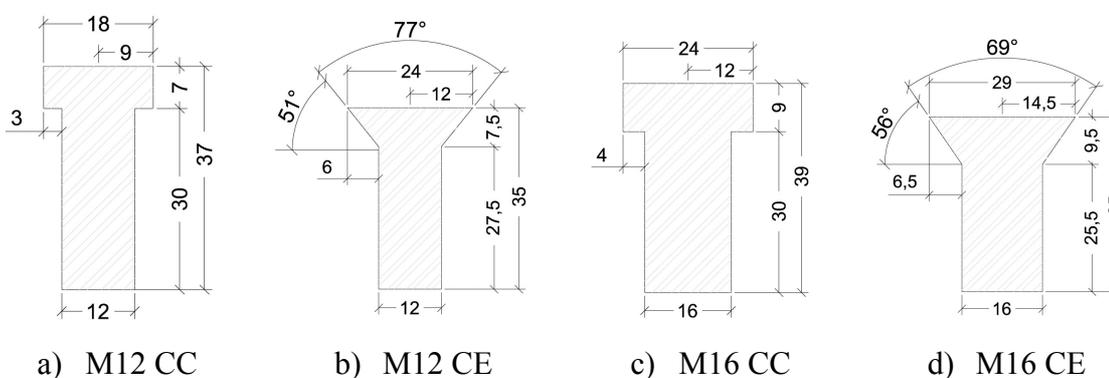


a) Configurações com parafusos M12



b) Configurações com parafusos M16

Figura 3.3 – Vista em planta (esq.) e em corte transversal (dir.) da chapa interior - [mm]



a) M12 CC

b) M12 CE

c) M16 CC

d) M16 CE

Figura 3.4 – Dimensões em [mm] dos parafusos

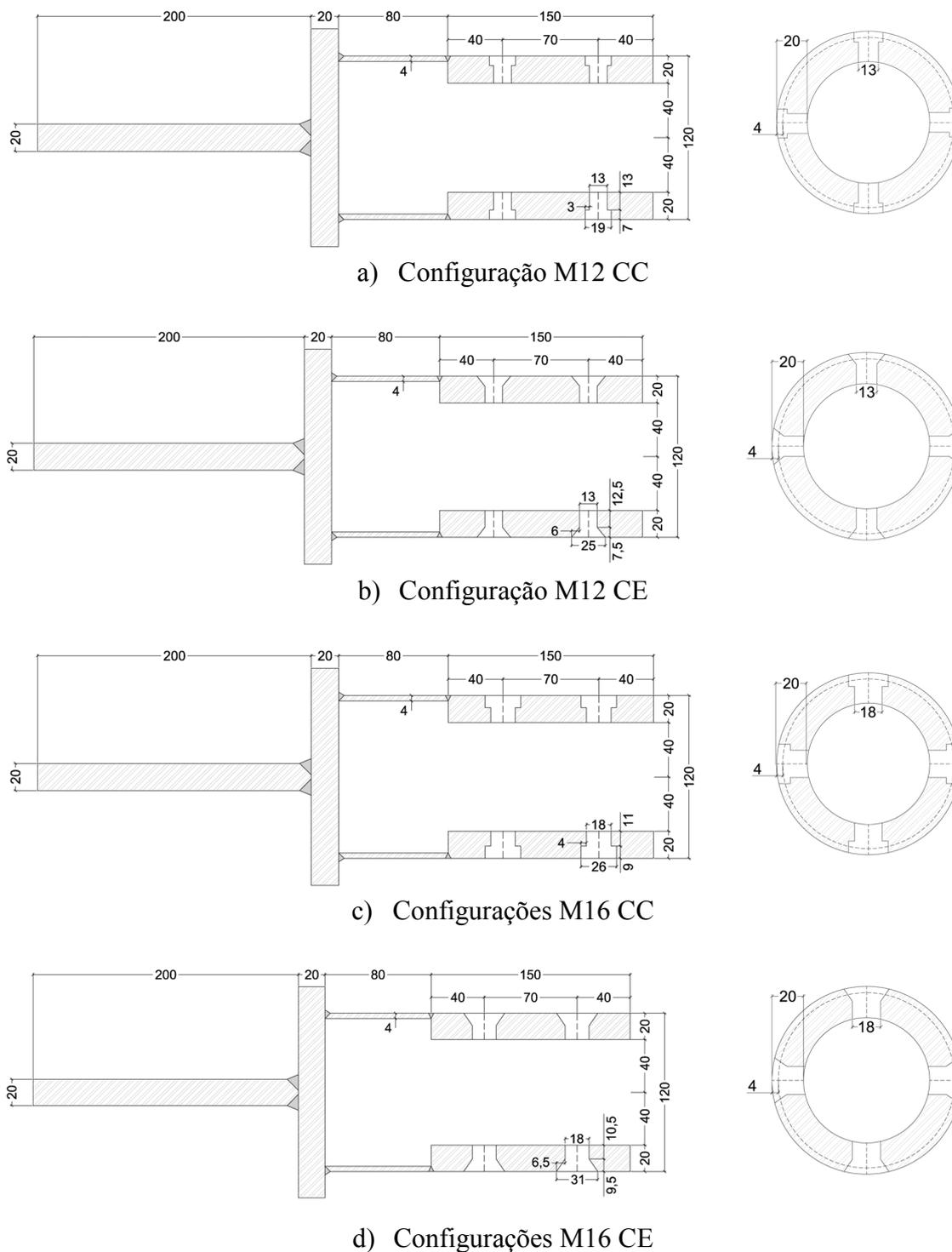


Figura 3.5 – Vista em corte longitudinal (esq.) e transversal (dir.) das componentes exteriores da ligação - [mm]

3.2.2 Caracterização do material

Os ensaios de caracterização do material realizados no âmbito da dissertação de Vasconcelos (2015) permitiram obter com rigor as propriedades mecânicas reais do perfil de secção tubular circular, das chapas interiores e dos parafusos que fazem parte das várias configurações estudadas.

Para tal efetuaram-se ensaios de tração pura de acordo com a norma ISO 6892-1 (CEN, 2009), em provetes com espessura nominal de 4 mm, 5 mm e 8 mm e nos 4 tipos de parafusos diferentes utilizados nas configurações ensaiadas. Nos Quadros 3.2 e 3.3 apresentam-se os valores médios da tensão de cedência e da tensão última, obtidos através destes ensaios.

Quadro 3.2 – Valores médios obtidos para as tensões dos provetes

Provetes	Tensão de Cedência f_y [MPa]	Tensão Última f_u [MPa]
t = 4 mm	399,81	490,59
t = 5 mm	374,28	526,77
t = 8 mm	384,62	558,14

Quadro 3.3 - Valores médios obtidos para as tensões dos parafusos

Parafusos	Tensão de Cedência f_y [MPa]	Tensão Última f_u [MPa]
M12 CC	892,73	995,19
M12 CE	812,80	904,07
M16 CC	1042,50	1196,10
M16 CE	1051,01	1194,11

3.3 Descrição do modelo numérico

3.3.1 Geometria do modelo

A definição da geometria do modelo numérico obriga habitualmente a recorrer a simplificações, uma vez que é bastante difícil reproduzir em ambiente de modelação, com total fidelidade, todas as singularidades dos elementos reais. Outra razão para simplificar a geometria do modelo é que quanto maior e mais complexa esta for, maior é o tempo computacional da análise. Portanto, o principal objetivo desta etapa foi estabelecer simplificações na geometria da ligação que permitissem reduzir o tempo de análise e facilitar o processo de modelação, sem comprometer a confiança nos resultados.

Desta forma, tirando partido da simetria da ligação, o modelo numérico contempla apenas um oitavo da ligação original e é constituído por três componentes distintas: componente Perfil + Tubo, chapa interior e dois parafusos.

Os parafusos foram modelados com elementos sólidos, sem pormenorização da rosca, reduzindo o diâmetro dos mesmos para obter uma área de parafuso igual à área da secção resistente A_s . Com o intuito de manter a altura da cabeça do parafuso constante, esta alteração do diâmetro dos parafusos modificou ligeiramente o ângulo das faces inclinadas da cabeça dos parafusos de cabeça de embeber e, no caso dos parafusos de cabeça circular, levou a um aumento da área da cabeça que apoia no escareado do tubo. As dimensões dos parafusos dos modelos podem ser visualizadas na Figura 3.6.

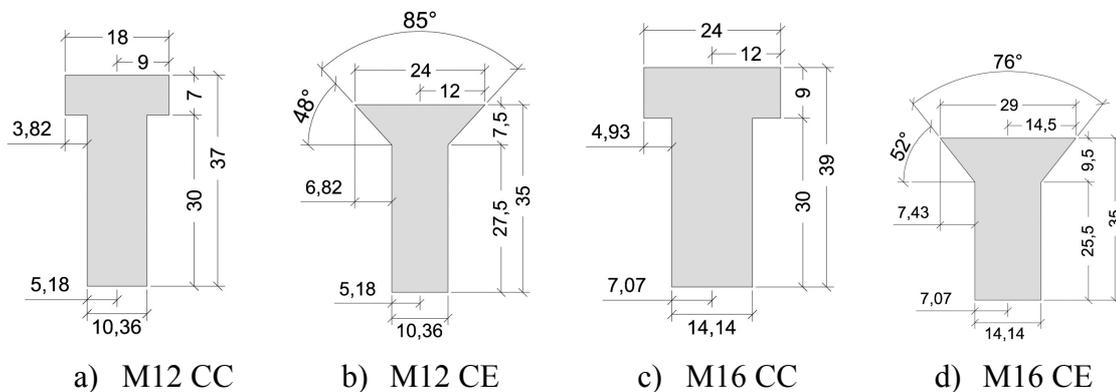


Figura 3.6 – Dimensões em [mm] dos parafusos do modelo

O diâmetro dos furos d_0 do tubo mecânico foi calculado tendo em conta o diâmetro reduzido dos parafusos d , sabendo que para parafusos M12 é igual a $d+1$ e que para parafusos M16 é igual $d+2$. O diâmetro dos furos na chapa interior, por estes serem roscados, foi considerado igual ao diâmetro reduzido dos parafusos. Apesar de ser possível argumentar que a rosca do parafuso, quando sujeita à compressão pela chapa, pode moer, criando assim uma distância entre o furo e o parafuso superior à considerada no modelo, essa possibilidade foi excluída ao observar que nos ensaios a rosca não sofreu deformação.

O perfil tubular e o tubo mecânico foram modelados como uma só peça, de secção e propriedades mecânicas distintas, não tendo sido modelada a chapa de topo. Na Figura 3.7 pode-se observar a vista em corte longitudinal e transversal desta componente, para as várias configurações modeladas.

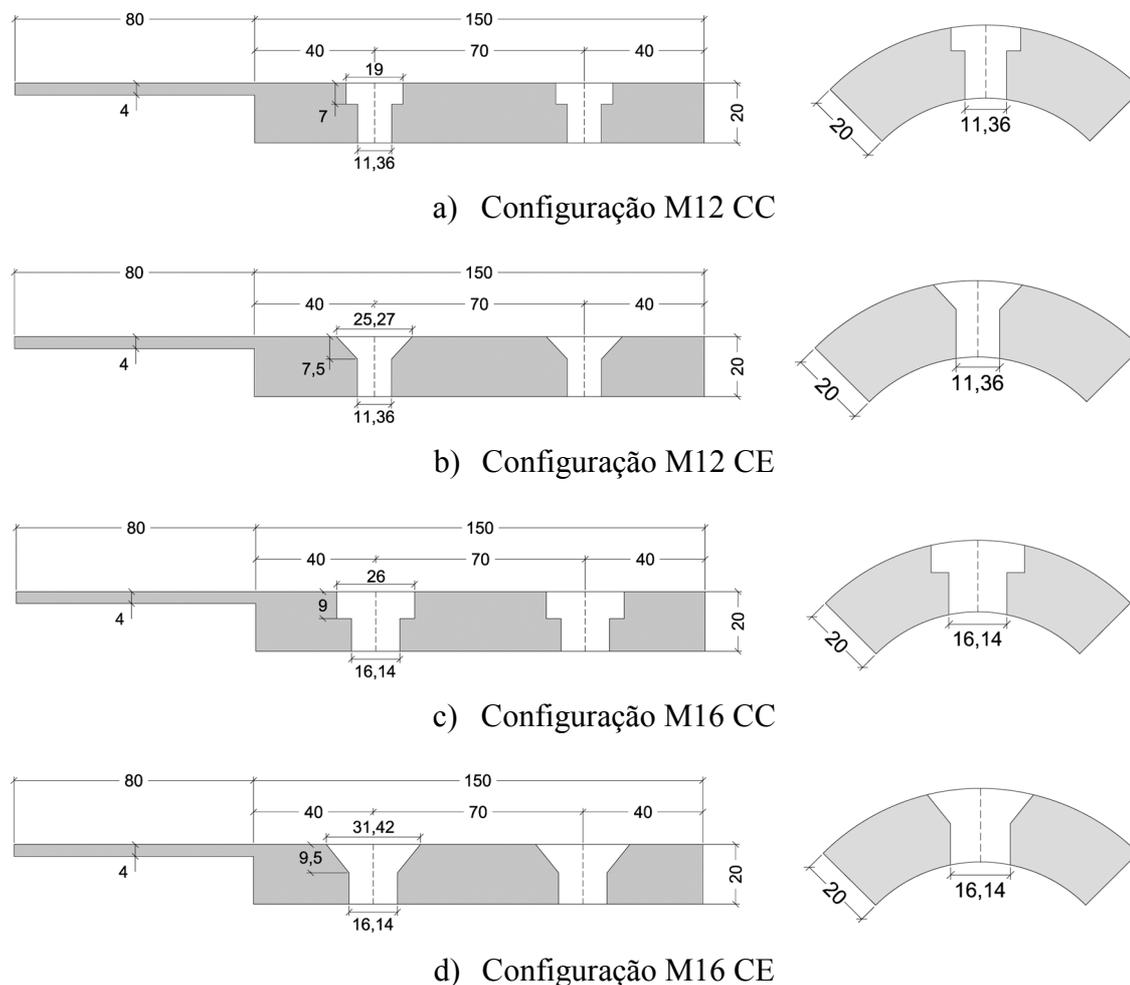


Figura 3.7 – Vista em corte longitudinal (esq.) e transversal (dir.) das componentes Perfil + Tubo do modelo - [mm]

No caso dos modelos em que o modo de rotura previsto é a rotura pela secção transversal bruta do perfil tubular, foi definida a zona afetada pelo calor resultante da soldadura do perfil ao tubo mecânico, através de uma diminuição da resistência do material, por se ter verificado que a rotura dos modelos experimentais ocorreu nessa zona em particular.

Uma vez que conhecer a extensão real da zona afetada pelo calor e a diminuição de resistência da peça nesta zona é um processo complexo, foi feita uma aproximação considerando uma largura de 10 mm e uma redução de 80% da resistência do material base. A definição destes valores foi fruto de várias iterações ao modelo numérico, sendo os critérios de escolha a comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais e o modo de rotura obtido. A modelação da zona afetada pelo calor no ambiente do programa *Abaqus* encontra-se ilustrada na Figura 3.8.

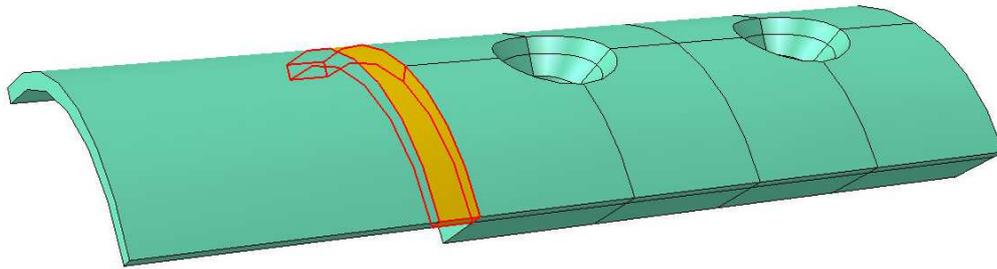


Figura 3.8 – Definição da zona afetada pelo calor

A chapa interior foi modelada com as suas dimensões em planta e espessura reais, tal como se ilustra na Figura 3.9.

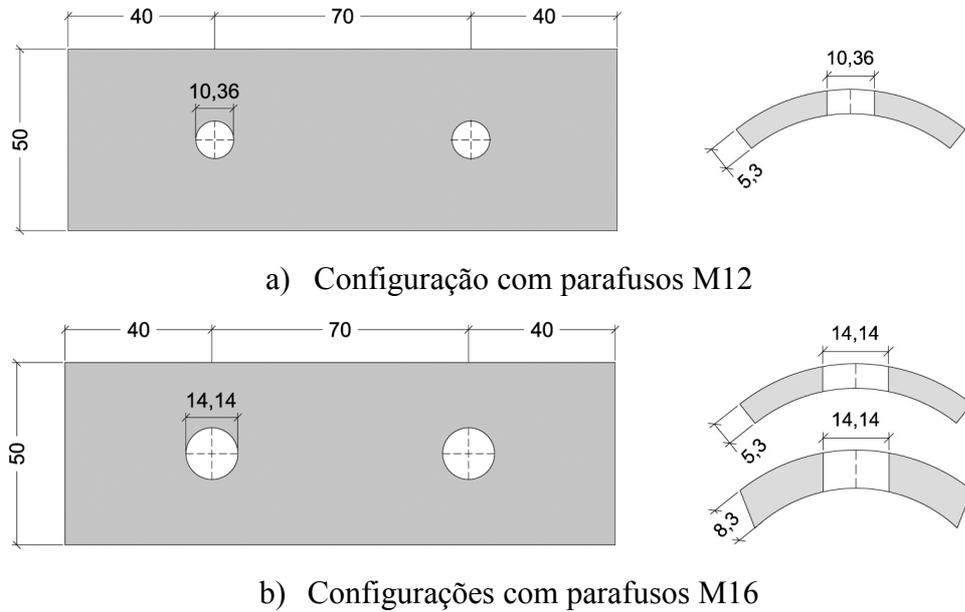


Figura 3.9 – Vista em planta (esq.) e em corte transversal (dir.) da componente chapa interior - [mm]

3.3.2 Propriedades dos materiais

Todos os elementos da ligação foram considerados como sendo em aço estrutural, material isotrópico com comportamento elasto-plástico, com um coeficiente de Poisson ν de 0,3 e um módulo de elasticidade E de 210 GPa, tal como definido no Eurocódigo 3 (CEN, 2005a).

As curvas tensão-extensão do material usadas nos modelos numéricos foram definidas a partir das curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios de caracterização dos materiais dos vários tipos de parafusos e provetes representativos do aço do perfil e das chapas.

Os provetes com espessura nominal de 4 mm referem-se ao material do perfil tubular circular e os provetes de espessura nominal 5 mm e 8 mm aos materiais das chapas interiores com espessuras reais de 5,3 mm e 8,3 mm, respetivamente.

Para o tubo mecânico, não foram realizados ensaios de caracterização por se tratar de um componente com uma resistência muito mais elevada que os restantes. Por conseguinte modelou-se o material desta componente com base na à curva de tensão-extensão nominal para aços da classe S355, sugerida pelo Eurocódigo 3.

Para definir o comportamento do material, o programa *Abaqus* requer que a curva de tensão-extensão seja definida em termos de tensão real e de extensão plástica real, valores estes que podem ser obtidos em função dos valores de tensão e extensão nominais através das seguintes equações (Abaqus, 2013).

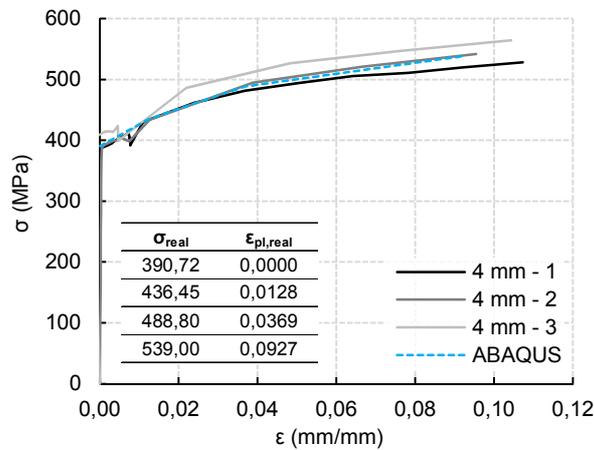
$$\sigma_{real} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (3.2)$$

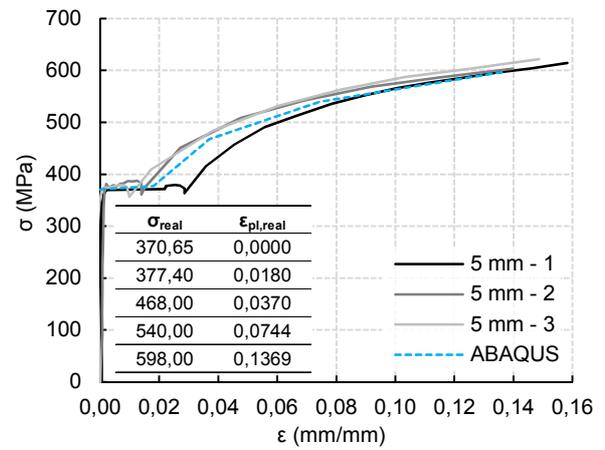
$$\varepsilon_{real,pl} = \varepsilon_{real} - \frac{\sigma_{real}}{E} \quad (3.3)$$

As curvas do material a usar no programa foram definidas com base nas curvas reais através do método dos mínimos quadrados e foram ajustadas posteriormente, comparando iterativamente os resultados numéricos com os resultados experimentais. Este procedimento tem em conta que apesar de ser constituído pelo mesmo material, cada elemento tem as suas imperfeições e portanto tem também um comportamento distinto durante os ensaios, tal como se pode constatar pelas curvas tensão-extensão, onde para o mesmo tipo de parafuso ou de provete se obtiveram valores de tensão de cedência, tensão última e extensão na rotura diferentes.

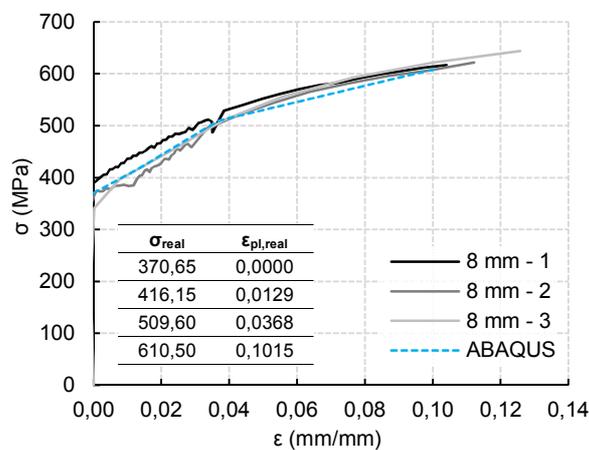
Na Figura 3.11 e Figura 3.10 apresentam-se as curvas do material consideradas na análise numérica através do programa *Abaqus*, em valores de tensão real e extensão plástica real. As primeiras curvas apresentadas foram obtidas através dos ensaios realizados por Vasconcelos (2015). No caso dos parafusos M16, por estes apresentarem valores muito aproximados de tensão de cedência e de tensão última nas duas configurações estudadas, optou-se por considerar apenas uma curva para os dois tipos de parafusos. A última curva apresentada diz respeito ao material do tubo mecânico e foi calculada com base nos valores nominais contemplados pelo Eurocódigo.



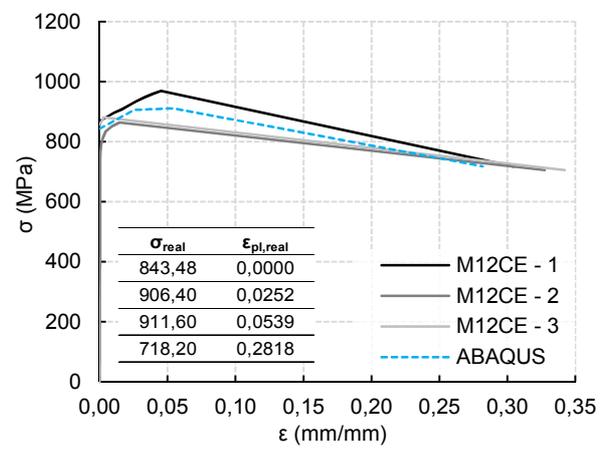
a) Provetes de 4 mm



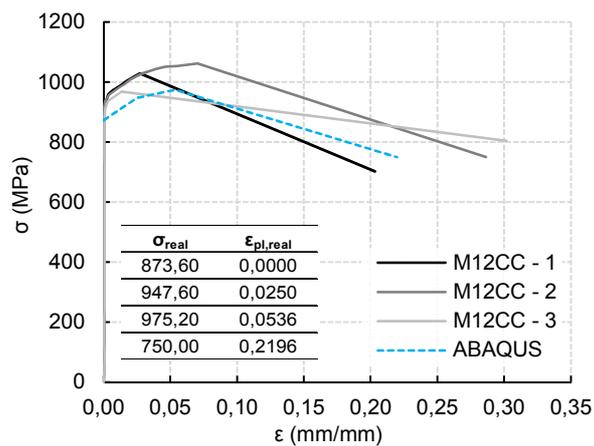
b) Provetes de 5 mm



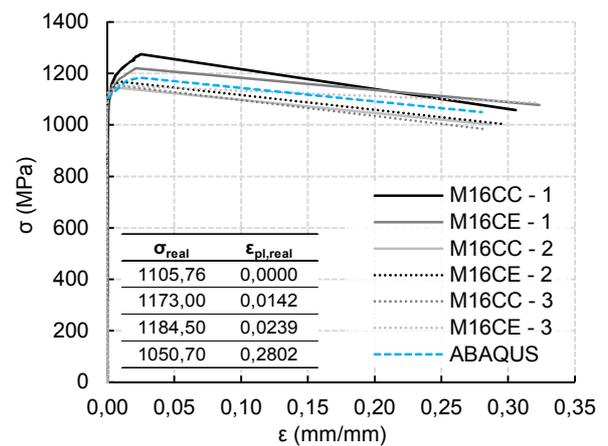
c) Provetes de 8 mm



d) Parafusos M12 CC



e) Parafusos M12 CE



f) Parafusos M16

Figura 3.10 – Curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente e curva definida no programa *Abaqus*

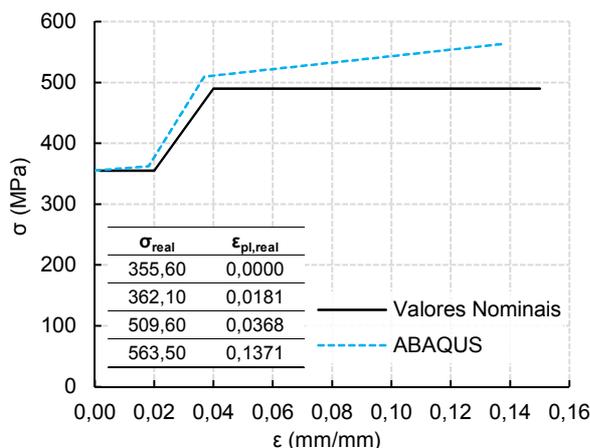


Figura 3.11 – Curva tensão-extensão do material do tubo mecânico

3.3.3 Tipo de elementos

O programa *Abaqus* oferece uma vasta e completa biblioteca de elementos, que se adaptam aos vários tipos de análise e de modelação idealizados, sendo cada elemento caracterizado por família, número de graus de liberdade (GDL), número de nós, formulação e integração.

A família dos elementos define o tipo de geometria dos mesmo, podendo estes ser elementos contínuos (ou sólidos), de casca, viga, barra, entre outros. Dada a geometria tridimensional do modelo em estudo, a escolha dos elementos fica restringida a dois tipos: elementos sólidos ou elementos de casca. A opção por elementos de casca foi descartada uma vez que na literatura existente estes elementos eram frequentemente referenciados como pouco apropriados para a modelação de problemas de contacto, particularmente entre parafusos e chapas (Coelho, 2004), tendo por isso sido escolhidos elementos sólidos.

Para simulações de deslocamento com elementos sólidos, o programa *Abaqus* considera que os graus de liberdade calculados em cada elemento são os graus de liberdade translacionais x , y e z , ficando o campo de deslocamentos definido apenas em termos dos deslocamentos nodais, calculados por interpolação em cada nó. A ordem da interpolação é determinada pelo número de nós de cada elemento. No caso do modelo estudado foram escolhidos elementos cúbicos de interpolação linear de primeira ordem, com 8 nós (um em cada vértice), como o que se exhibe na Figura 3.12.

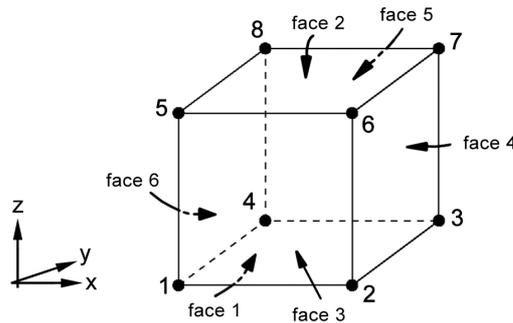


Figura 3.12 – Elemento cúbico linear de 8 nós

Para análises não-lineares, que envolvam plastificação e modelação de contacto, os elementos de primeira ordem são os que melhor representam as descontinuidades na fronteira de cada elemento e o campo de tensões, e portanto os que permitem obter melhores resultados numéricos (Abaqus, 2013).

Quanto à integração, o programa *Abaqus* recorre à quadratura de Gauss para realizar a integração numérica nos pontos de cada elemento. O número de pontos considerados distingue uma integração completa de uma integração reduzida.

Nos elementos de integração reduzida o número de pontos de integração é o suficiente para obter a contribuição exata do campo de extensões de ordem inferior à ordem da interpolação. Na Figura 3.13 apresenta-se um esquema dos pontos de integração considerados na face de um elemento cúbico de 8 nós, para integração completa e integração reduzida.

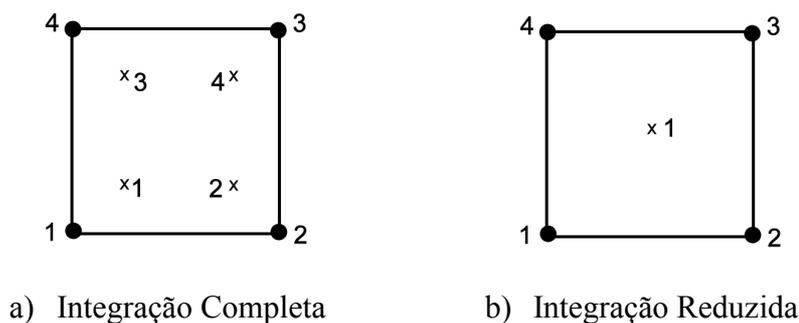


Figura 3.13 – Pontos de integração de Gauss para a face de um elemento cúbico de 8 nós

Para compreender a influência dos dois tipos de integração, foi feito um estudo comparativo entre os resultados obtidos utilizando os dois tipos de elementos e o respetivo tempo da análise. Os modelos com elementos de integração completa demoraram em média 47% mais a completar a análise do que aos modelos com elementos de integração reduzida.

Quanto aos resultados, em termos de rigidez e de resistência não se registaram grandes alterações que justificassem o acrescido esforço computacional, tal como se demonstra na Figura 3.14, para os modelos M12 CC descritos no Quadro 3.1.

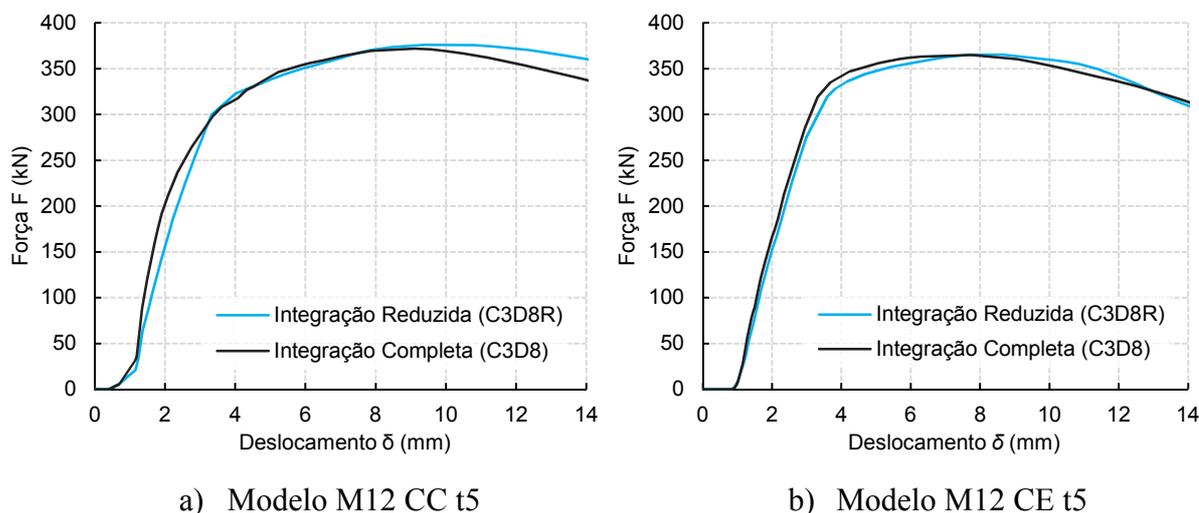


Figura 3.14 – Estudo comparativo do tipo de integração dos elementos nos modelos M12 t5

Desta forma, na presente modelação foram considerados elementos de integração reduzida, uma vez que se considerou que a utilização de elementos de integração completa levaria a tempos computacionais da análise significativamente superiores sem que isso se traduzisse em melhorias notáveis dos resultados.

Para além da vantagem da diminuição significativa do tempo computacional de análise e do tamanho de armazenamento dos ficheiros de modelação, outra vantagem associada à utilização de integração reduzida é que as tensões e extensões são calculadas nos pontos que oferecem maior precisão de resultados, os chamados pontos de Barlow (Abaqus, 2013).

Uma desvantagem em recorrer a este método de integração é o facto de poderem ocorrer modos de deformação nos elementos sem que se gerem extensões nos pontos de integração. Estes modos de deformação, também conhecidos como modos de energia nula ou fenómeno *hourglassing*, podem ser propagados ao longo da malha e originar problemas de convergência, comprometendo a fidelidade dos resultados. Para contornar este problema, quando se utilizam elementos de primeira ordem com integração reduzida, o programa *Abaqus* adiciona energia artificial ao modelo para controlar o fenómeno *hourglassing*, através do método de rigidez artificial proposto por Flanagan and Belytschko (1981).

Por último, a formulação de um elemento diz respeito à teoria matemática usada para descrever o seu comportamento. Em problemas não lineares em que existe uma grande influência da alteração da geometria da estrutura devido à deformação, particularmente em problemas com deformações muito elevadas para serem consideradas infinitesimais, é possível adotar três formulações, a formulação Euleriana, a formulação Lagrangeana ou a formulação Lagrangeana atualizada (Dias da Silva, 2002):

Na formulação de Euler, as grandezas envolvidas são definidas em relação à configuração deformada, ficando as tensões definidas pelo tensor de Cauchy e as extensões pelo tensor de Almansi. Esta formulação, quando utilizada em problemas de Mecânica dos Sólidos, apresenta a desvantagem de os limites em que são efetuadas as integrações não se manterem constantes, e as coordenadas de cada ponto da estrutura se alterarem durante a deformação. Por esta razão, a formulação Euleriana é habitualmente usada em problemas de Mecânica dos Fluidos.

Na formulação de Lagrange, as grandezas envolvidas são definidas em relação à configuração indeformada, sendo as tensões definidas pelo tensor de Piola-Kirchhoff e as extensões pelo tensor de Green. As coordenadas de cada ponto são constantes, o que em elementos finitos significa que os pontos contidos num elemento não se alteram durante a deformação.

A formulação atualizada de Lagrange é considerada uma formulação intermédia, em que a cada incremento de carga é utilizada uma fórmula lagrangeana, sendo que fim de cada incremento as coordenadas da estrutura são atualizadas para a configuração deformada. No incremento seguinte, estas coordenadas e as tensões já instaladas são consideradas como correspondentes ao estado indeformado. A malha mantém-se ligada aos pontos materiais durante todo o processo, o que de uma forma mais genérica significa que a malha deforma juntamente com o material

Para análises não lineares de deslocamentos e tensões, que é o caso da análise numérica efetuada, o *Abaqus* utiliza a formulação Lagrangeana atualizada.

Pelo exposto, os elementos escolhidos para discretizar o modelo foram os elementos C3D8R, que são elementos lineares sólidos, de oito nós e de integração linear reduzida. Por razões relacionadas com a geometria e refinamento da malha, no núcleo dos parafusos não foi possível utilizar este tipo de elementos, tendo-se recorrido a elementos C3D6, que são elementos lineares sólidos, em forma de prisma triangular com 6 nós, como o que se ilustra na Figura 3.15.

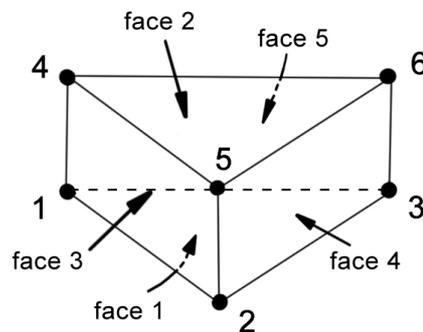


Figura 3.15 – Elemento prismático triangular com 6 nós

3.3.4 Discretização da malha

A malha de elementos finitos deve ser suficientemente refinada para que os resultados obtidos sejam precisos e fiáveis, mas que a sua dimensão em número de elementos possibilite uma análise em tempo útil.

Sendo a definição da malha um dos fatores que mais influencia os resultados numéricos, foi realizado um estudo de convergência da malha, onde se fez variar a discretização da malha da chapa interior e dos parafusos. Os parâmetros de interesse neste estudo foram a resistência e rigidez da ligação, o tempo computacional da análise, e o rácio entre a energia artificial e a energia interna do sistema.

Tal como foi referido na secção interior, ao utilizar elementos de integração reduzida é adicionada energia artificial durante a análise para combater o fenómeno de *hourglassing*, o que pode introduzir erro nos resultados obtidos. Para garantir a fiabilidade do modelo nesta situação, o rácio entre a energia artificial e a energia interna do sistema não deve exceder os 5%, de acordo com as recomendações do guia de utilizador do programa (Abaqus, 2013). Apesar da calibração do modelo ser feita por comparação com resultados experimentais realizados no âmbito do mesmo estudo e os resultados do balanço energético não comprometerem a validação dos modelos numéricos, uma vez que será feito um estudo paramétrico, considerou-se prudente avaliar a relação da energia artificial AE com a energia interna IE como meio de atingir a discretização a malha.

Para o componente Perfil + Tubo foram considerados elementos de 3 mm e para a chapa interior e parafusos foram testados os resultados obtidos com elementos de 3 mm e 2 mm. Na Figura 3.16 apresentam-se as curvas força-deslocamento obtidas para os dois tipos de malha da chapa interior e dos parafusos, nos modelos com parafusos M12. Na Figura 3.17 apresenta-se o rácio AE/IE ao longo do tempo da análise.

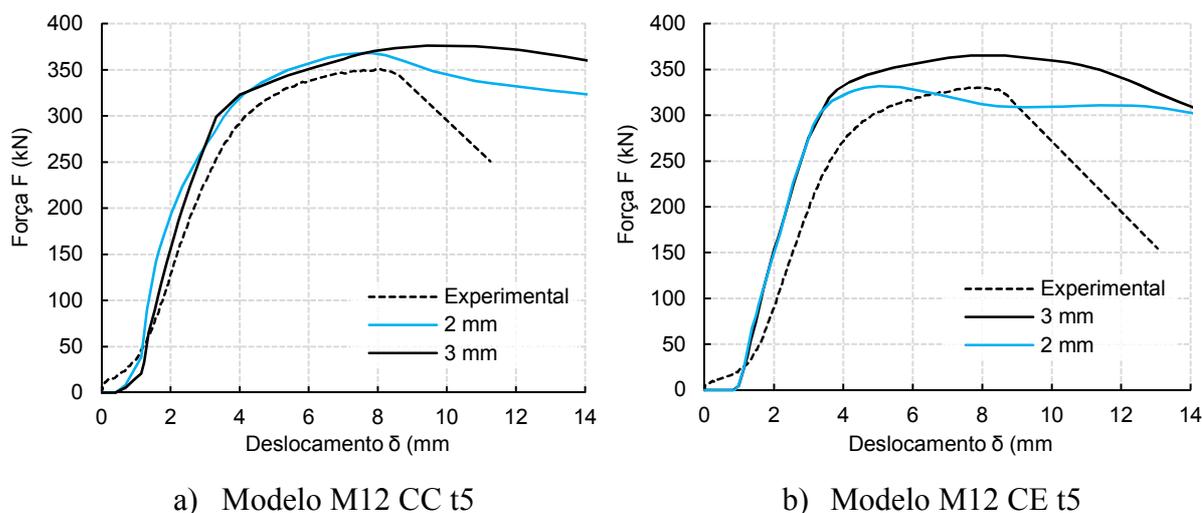


Figura 3.16 – Estudo de convergência da malha nos modelos M12 t5

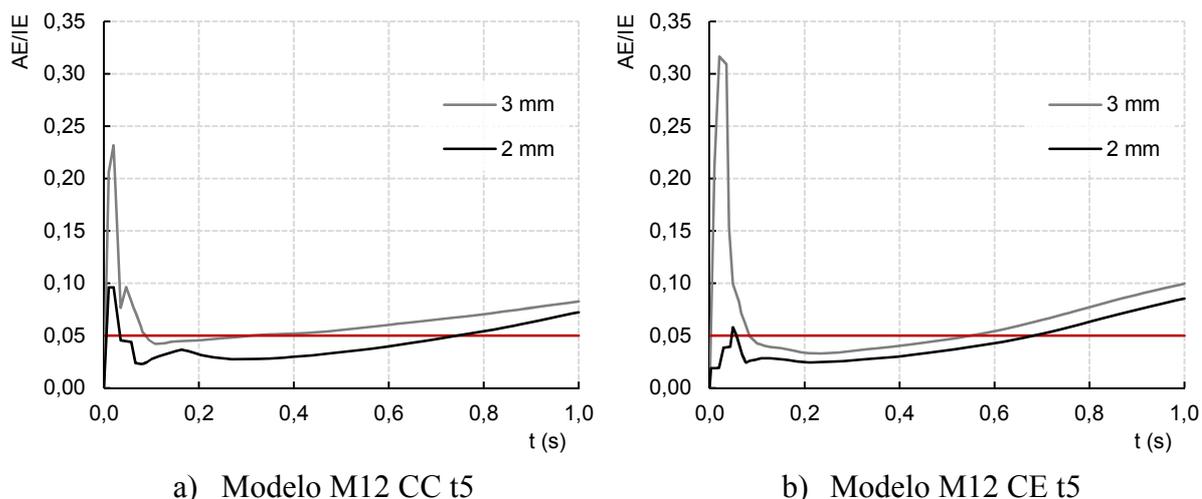


Figura 3.17 – Estudo comparativo da influência da malha no rácio AE/IE nos modelos M12 t5

Pelas curvas força-deslocamento apresentadas, pode-se constatar que o uso de uma malha mais refinada, no caso do modelo M12 CC t5, levou a uma pequena diminuição da resistência e alterou o comportamento da ligação na fase da rotura, mantendo-se a rigidez praticamente inalterada. Já no caso do modelo M12 CE t5, a rigidez do modelo não sofreu qualquer alteração, no entanto a força máxima alcançada durante a análise diminuiu e houve também uma alteração considerável no desenvolvimento da curva na fase plástica.

Quanto às considerações energéticas, para a malha com elementos de 3 mm, o programa adicionou uma grande quantidade de energia artificial na fase inicial da análise, o que resultou num rácio AE/IE substancialmente acima dos 5% de referência. Em comparação, para a discretização com malha de 2 mm houve uma diminuição da energia artificial inicial e o desenvolvimento da curva AE/IE foi quase todo feito abaixo da linha dos 5%. Na fase final da análise, o rácio aumenta novamente, ultrapassando o valor de referência no incremento de tempo correspondente à rotura, o que certifica que este aumento pode ser desprezado. Desta forma é aceitável dizer que, para uma malha de 2 mm na chapa interior e nos parafusos, os resultados obtidos são, do ponto de vista energético, mais fiáveis quando comparados com os resultados obtidos com malha de 3 mm.

Os modelos com malha de 2 mm tiveram, em média, um tempo de análise 47% superior ao tempo de análise dos modelos com malha de 3 mm. Apesar de computacionalmente mais morosa, a análise com a malha de 2 mm na chapa interior e nos parafusos permitiu obter resultados mais aproximados do experimental e também mais fiáveis a nível energético. Pelo exposto, adotou-se uma malha com elementos de 3 mm para a componente Perfil + Tubo e com elementos de 2 mm para as componentes chapa interior e parafusos, cuja discretização no ambiente do programa *Abaqus* se apresenta na Figura 3.18 à Figura 3.20.

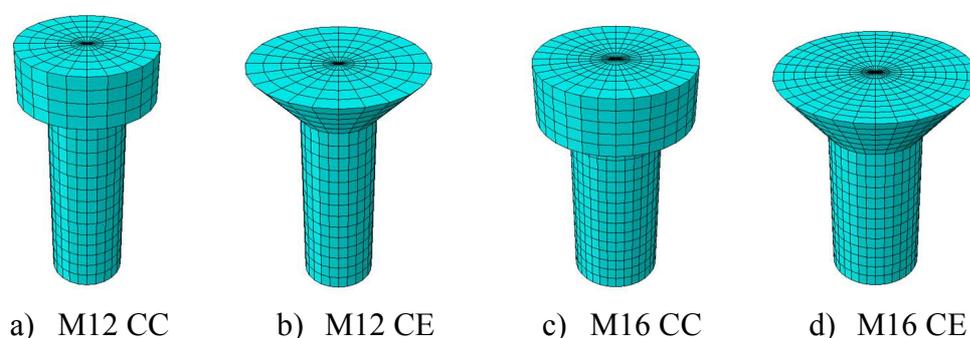


Figura 3.18 – Discretização dos parafusos

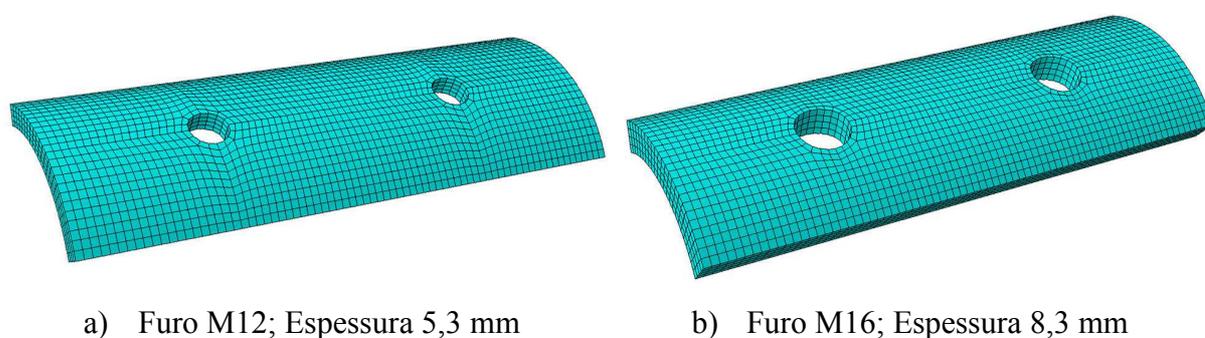


Figura 3.19 – Discretização da chapa interior

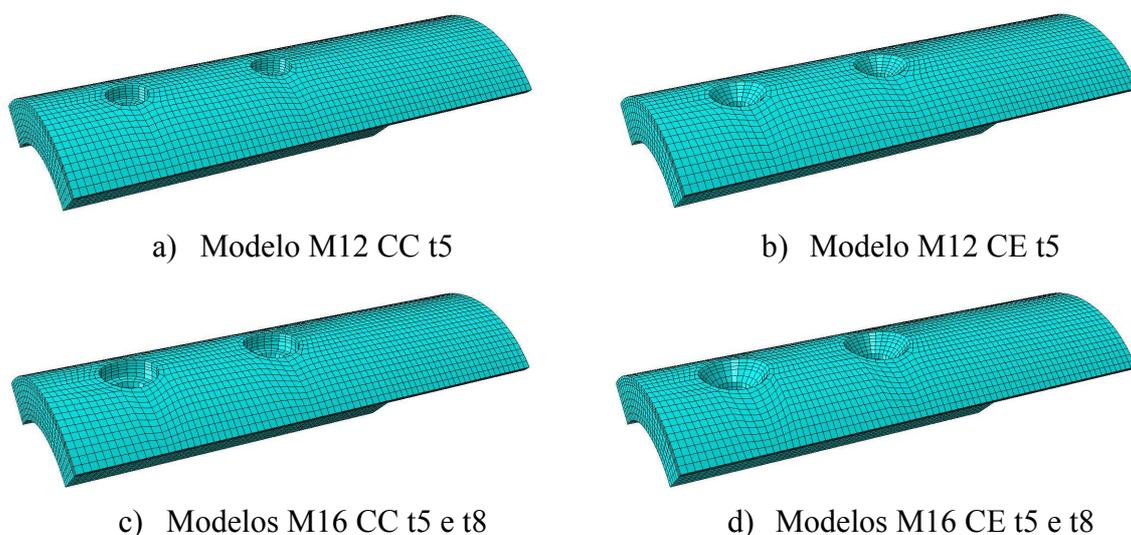


Figura 3.20 – Discretização da componente Perfil + Tubo

3.3.5 Condições de apoio e carregamento

Uma vez que se modelou apenas uma parte da ligação, foram consideradas condições de apoio que simulam a continuidade dos elementos. As superfícies da componente Perfil + Tubo e as arestas da chapa interior, que resultam do seccionamento da ligação, foram restringidas ortogonalmente em relação ao eixo longitudinal da peça. Na superfície da chapa interior que resulta do seccionamento, foi aplicado um deslocamento longitudinal para reproduzir os efeitos da carga axial à qual a ligação foi sujeita durante o ensaio. Para simular a ligação do perfil à chapa de topo usada nos modelos ensaiados experimentalmente, a face correspondente foi restringida na direção do deslocamento imposto. As condições de apoio e carregamento descritas que foram impostas ao modelo numérico podem ser observadas nas Figuras 3.21, 3.22 e 3.23.

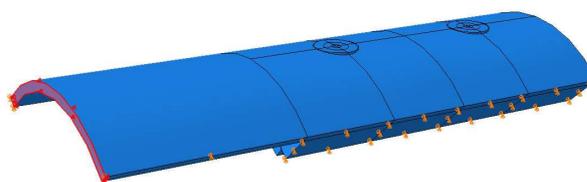


Figura 3.21 – Condição de apoio de restrição ao deslocamento das faces

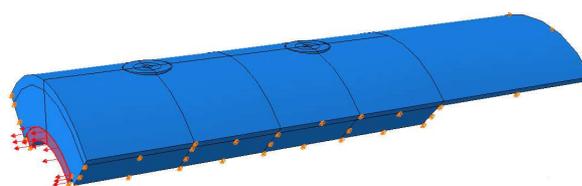


Figura 3.22 – Condição de carregamento através de imposição de deslocamento

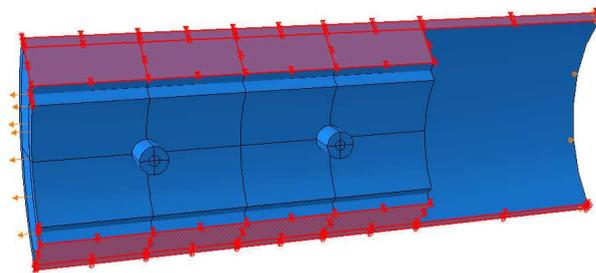


Figura 3.23 – Condição de apoio de continuidade da peça

3.3.6 Interação e contacto

Uma vez que o modelo numérico da ligação é constituído por 3 componentes distintas, foi necessário recriar as interações entre estas, para que os esforços com origem no deslocamento imposto à chapa interior fossem distribuídos para os parafusos e para a componente Perfil + Tubo de forma adequada. Definir as interações e o tipo de contacto entre as partes do modelo foi a tarefa mais complexa desta modelação e a que teve mais impacto nos resultados obtidos, principalmente ao nível da rigidez do modelo e dos modos de rotura obtidos. Foram definidos dois tipos de interação distintos: interação de contacto entre superfícies e interação *tie constraint*.

A primeira, tal como o nome indica, define a interação entre as superfícies dos furos da chapa e do tubo, em contacto com os parafusos, e entre as superfícies em contacto das faces da chapa e do tubo mecânico. Primeiramente foi necessário definir o tipo de contacto associado a esta interação. Uma vez que se trata de um contacto entre superfícies em aço, o contacto na direção tangencial permite o deslizamento entre as superfícies com um coeficiente de atrito μ de 0.2, valor este indicado em Wriggers (2002). Na direção normal, o contacto foi definido como “*hard contact*” para que não haja sobreposição do material e garantindo que a interação entre as superfícies apenas é ativada caso haja de facto contacto entre as superfícies em questão.

Definidas as propriedades do contacto entre as superfícies, o programa requer que se designem a superfície “*slave*” e a superfície “*master*” da interação. A superfície designada por “*master*” deve ser a menos discretizada ou a que é caracterizada pelo material mais rígido e pode penetrar a superfície “*slave*”. Inicialmente considerou-se como superfície “*master*” as superfícies dos furos, mas no caso específico dos modelos em estudo, o módulo de elasticidade do material das duas superfícies é igual e a dimensão dos elementos muito aproximada, o que levou a uma definição pouco rigorosa da superfície “*master*”, que conseqüentemente originou uma penetração acentuada do parafuso pelo material dos furos do tubo.

Para corrigir esta situação foi definida uma “interação dupla”, composta por duas interações de contacto; numa a superfície “*master*” é a superfície do parafuso e a superfície “*slave*” a superfície do furo do tubo/chapa, na outra interação o inverso acontece. A Figura 3.24 ilustra o problema da penetração anterior à definição da “interação dupla” e o resultado depois da aplicação da mesma.

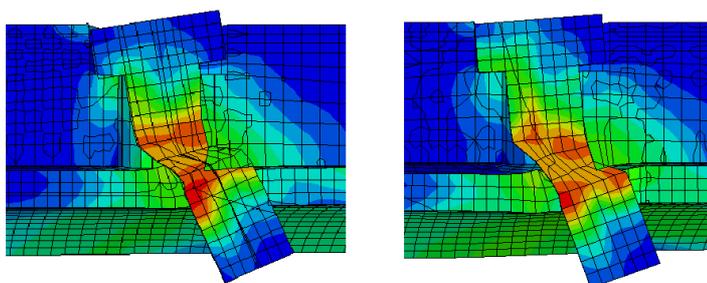


Figura 3.24 – Penetração do parafuso antes e depois da “interação dupla”

O outro tipo de interação considerada, designada no *Abaqus* por “*tie constraint*”, teve por objetivo simular o aperto dos parafusos à chapa interior. Alguns programas de modelação oferecem elementos de contacto específicos para simular ligações aparafusadas, ou elementos que apenas são ativados à compressão e que podem ser utilizados para simular o comportamento dos parafusos, mas no caso específico do *Abaqus/CAE* estas opções não estão disponíveis. A alternativa é a interação *tie*, que possibilita que se considerem duas áreas de contacto, que são fixadas uma à outra, não sendo possível variar a área de contacto ao longo da análise. Como é sabido que a área do parafuso em contacto com a chapa varia com a força aplicada e com a deformação da chapa, foi feito um estudo comparativo entre várias áreas de contacto para avaliar a influência deste parâmetro nos modelos e aferir qual a solução que permite obter os modos de rotura previstos e os resultados mais próximos dos resultados experimentais.

Admitiu-se que a área de contacto inicial entre o parafuso e a chapa não deverá ser inferior a $\frac{1}{4}$ da área da superfície do corpo do parafuso (Figura 3.25) e que no decorrer da análise esta área nunca poderá ser superior a $\frac{1}{2}$. Na Figura 3.26 apresentam-se as curvas força-deslocamento obtidas por variação de $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{8}$ e $\frac{1}{2}$ da área de contacto da interação *tie constraint*, entre a superfície do furo da chapa e a superfície do parafuso, para todos os modelos estudados.

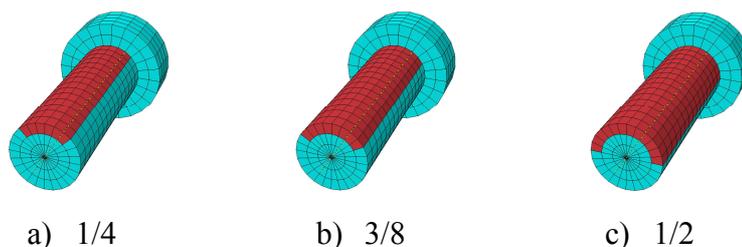
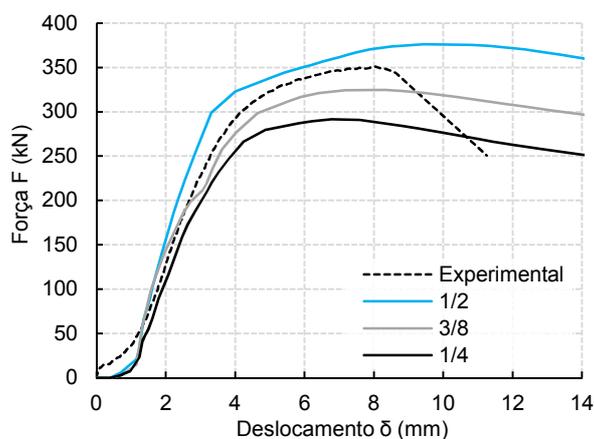
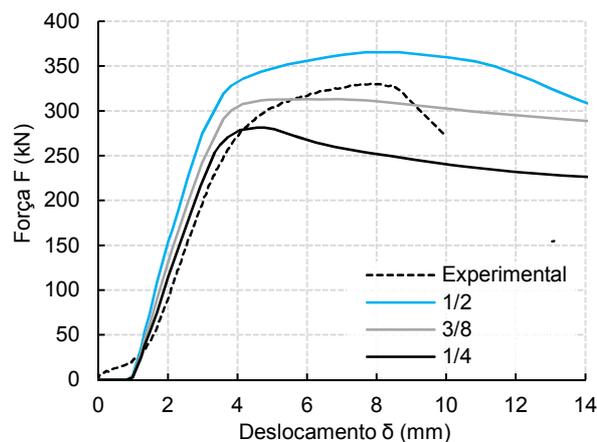


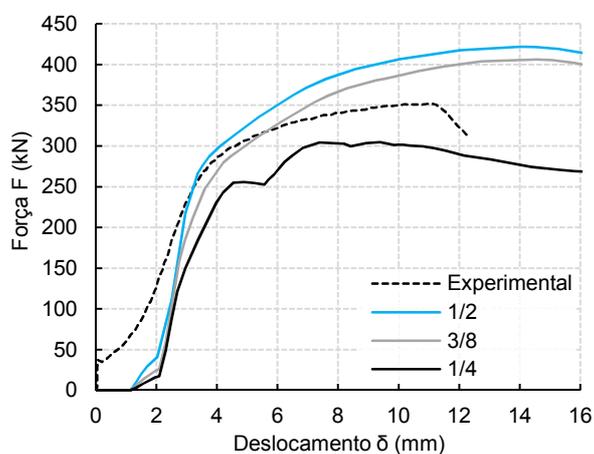
Figura 3.25 – Variação da área de contacto da superfície do corpo do parafuso



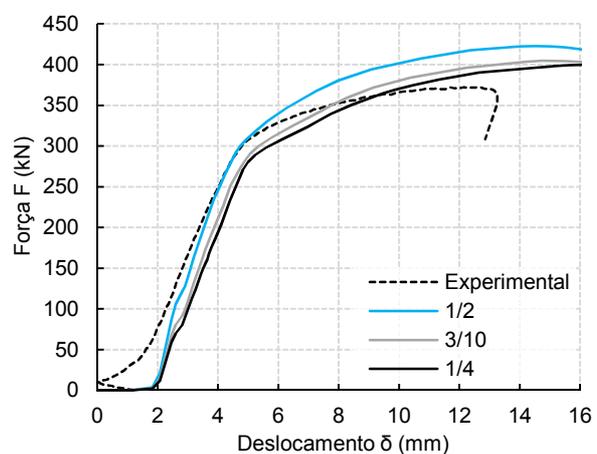
a) Modelo M12 CC t5



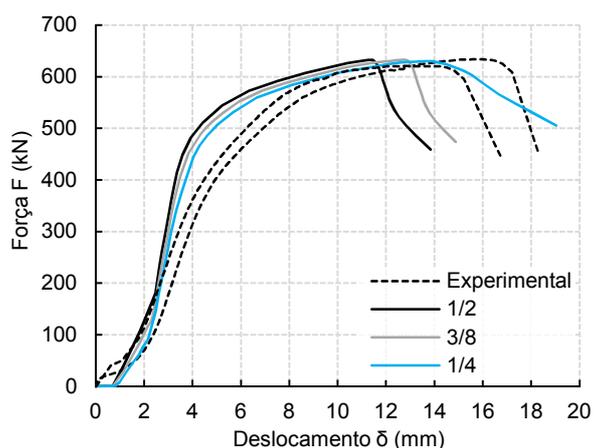
b) Modelo M12 CE t5



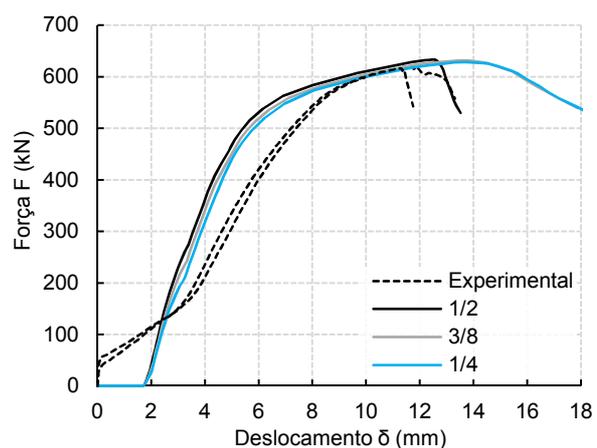
c) Modelo M16 CC t5



d) Modelo M16 CE t5



e) Modelo M16 CC t8



f) Modelo M16 CE t8

Figura 3.26 – Estudo comparativo da influência da área de contacto parafuso/furo da chapa

Para os dois modelos M12 t5, o modo de rotura obtido numericamente coincidiu com o obtido experimentalmente, que foi neste caso o corte dos parafusos. Olhando apenas para os gráficos apresentados poder-se-ia afirmar que a área de contacto de $\frac{3}{8}$, ou uma área de contacto compreendida entre $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{8}$, conduziria ao melhor ajuste da curva força-deslocamento numérica. No entanto, e lembrando que o processo de calibração foi altamente iterativo e que se realizou em vários sentidos e direções, esta etapa permitiu compreender a influência que o contacto tem no comportamento da ligação e concluir, após outras alterações ao modelo, que solução de contacto que melhor aproxima os resultados experimentais nos modelos com rotura por corte dos parafusos é uma área de contacto de $\frac{1}{4}$.

No caso dos modelos M16 t5, em que o modo de rotura previsto é a rotura pela secção útil da chapa interior, quando se estabeleceu uma área de contacto de $\frac{1}{4}$, a rotura não ocorreu durante o deslocamento imposto na análise. Com uma área de contacto de $\frac{1}{2}$, a rotura apesar de ter ocorrido pela chapa interior, não se deu pela linha da menor área útil A_{net} da chapa, como se ilustra na Figura 3.27, considerando-se desta forma a área de contacto entre os parafusos e o furo da chapa, $\frac{3}{8}$ da superfície do parafuso, para os modelos com rotura pela chapa interior.

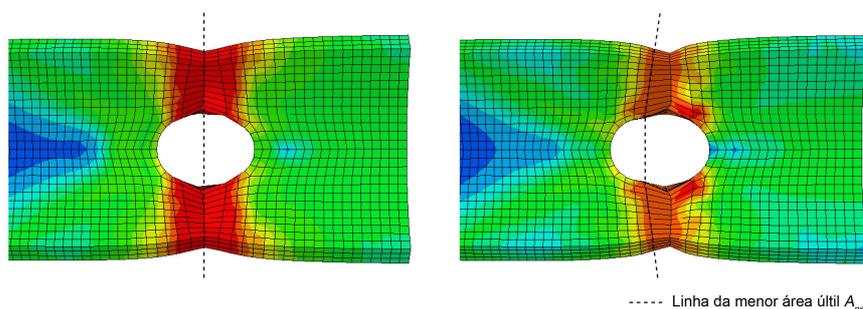


Figura 3.27 – Rotura da chapa pela secção útil para área de contacto de $\frac{3}{8}$ e $\frac{1}{2}$

No modelo M16 CC t8, cuja rotura é prevista acontecer pela secção transversal do perfil tubular, com uma modelação de $\frac{1}{4}$ da área de contacto, o modo de rotura obtido foi a rotura pela chapa interior. No caso do modelo M16 CE t8, a rotura só foi atingida pela secção transversal para uma área de contacto de $\frac{1}{2}$. Pelo descrito, a área de contacto utilizada no modelo M16 CC t8 foi de $\frac{3}{8}$, enquanto que no modelo M16 CE t8 foi adotada uma área de contacto entre $\frac{3}{8}$ e $\frac{1}{2}$, de aproximadamente 0,44 da área total da superfície do parafuso, para a qual foi verificada a rotura pela secção transversal.

Na Figura 3.28 é apresentado um esquema ilustrativo das interações e da *tie constraint* definidas entre as componentes do modelo, no ambiente de modelação do *Abaqus*.

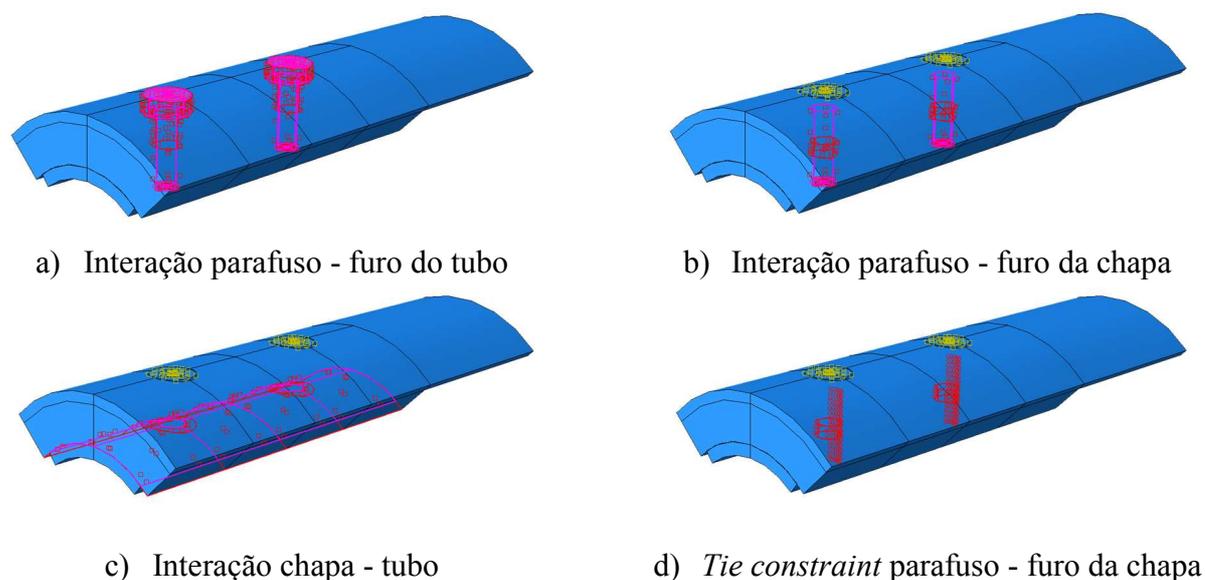


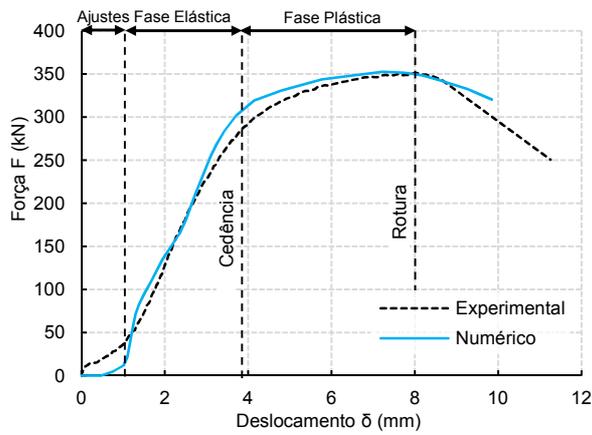
Figura 3.28 – Condições de interação e contacto consideradas nos modelos

3.3.7 Tipo de análise

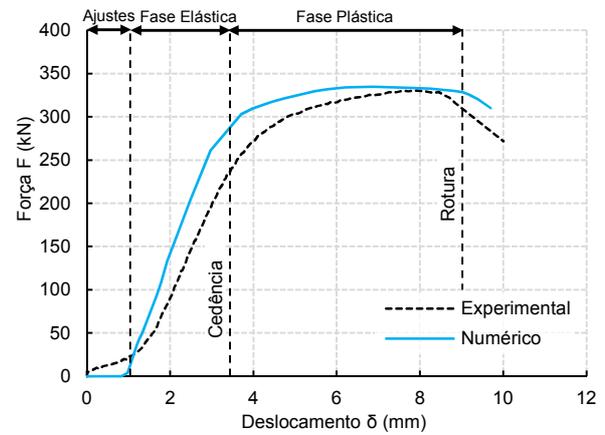
Para avaliar o comportamento do modelo numérico foi efetuada uma análise não linear, em controlo de deslocamento. Foi aplicado um deslocamento de 10 mm à chapa interior, o que totaliza um deslocamento total da ligação de 20 mm, valor este que nunca foi ultrapassado nos ensaios, e portanto garante que todas as fases do ensaio de tração são contempladas na análise numérica. Tal como referido, o tipo de formulação adotada pelo *Abaqus* para este tipo de análise foi a formulação Lagrangeana atualizada. No fim de cada incremento da análise de deslocamento, a geometria da peça sofre alterações, o que leva a que seja necessário atualizar a matriz de rigidez para iniciar o incremento seguinte da análise. Para realizar este procedimento considerou-se uma estratégia implícita, aplicando o método iterativo de Newton-Raphson Completo para forçar o equilíbrio estático entre as forças internas do modelo e as forças aplicadas.

3.4 Análise dos resultados

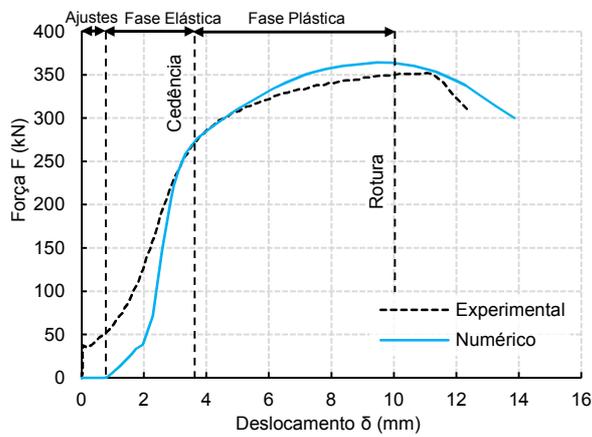
Os resultados obtidos numericamente são apresentados sob a forma de curvas força-deslocamento e através da representação gráfica das tensões equivalentes de von Mises no modelo, no incremento da análise após a rotura. Na Figura 3.29 são apresentadas as curvas força-deslocamento obtidas numericamente e por via experimental, onde são identificadas as várias fases do comportamento da ligação.



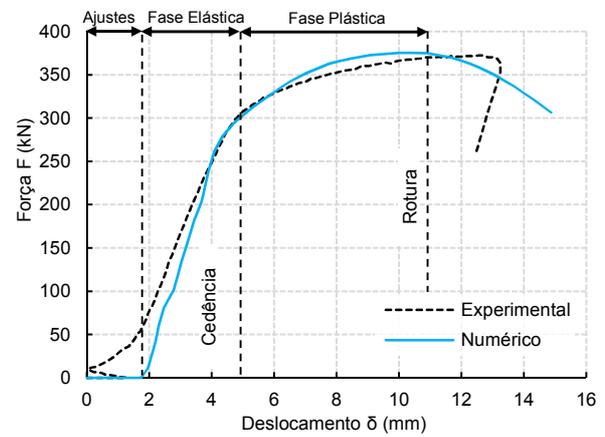
a) Modelo M12 CC t5



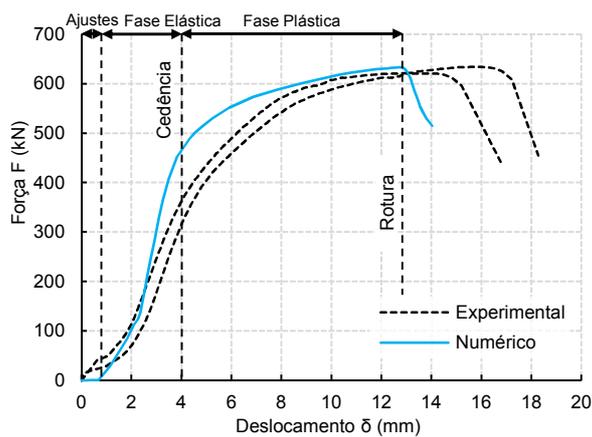
b) Modelo M12 CE t5



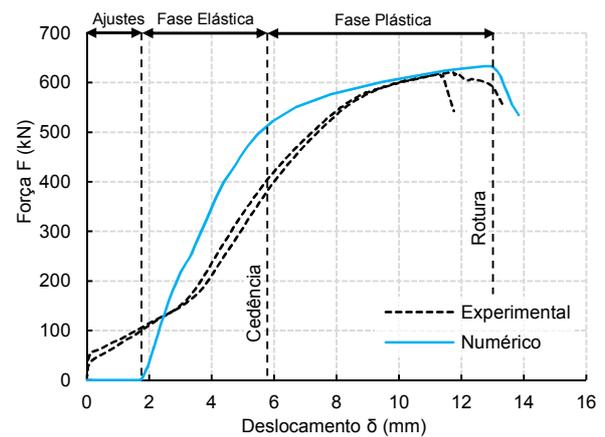
c) Modelo M16 CC t5



d) Modelo M16 CE t5



e) Modelo M16 CC t8



f) Modelo M16 CE t8

Figura 3.29 – Curvas força-deslocamento numéricas e experimentais

As curvas numéricas aproximam-se de uma forma geral das curvas experimentais e o seu desenvolvimento demonstra nitidamente as várias fases do comportamento da ligação durante o ensaio de tração: a fase de ajustes, a fase elástica e a fase plástica.

Nas curvas experimentais, em particular nos modelos M16 CC t5 e M16 CE t8, é visível no início da curva um troço caracterizado pelo aumento da força aplicada sem aumento de deformação, o que não acontece nas curvas numéricas. Este facto, não relevante para o comportamento global da ligação, está relacionado com a força de atrito estático que se desenvolve entre a chapa interior e o tubo mecânico, dependente da força de pré-esforço aplicada nos parafusos. Uma vez que nos ensaios experimentais a força de aperto (sempre muito baixa) não foi controlada de forma a ser igual em todas as configurações, isso justifica as pequenas diferenças verificadas nas fases iniciais das curvas (Ver Figura 3.29). Nas curvas numéricas não é visível este fenómeno uma vez que as forças de pré-esforço não foram consideradas na modelação numérica.

A fase de ajustes ocorre no início da análise e é caracterizada por um aumento do deslocamento com força nula. Isto acontece devido à folga existente entre o parafuso e o furo do tubo. Como esperado, a fase de ajuste desenvolve-se com deslocamentos maiores no caso dos parafusos M16 pois o diâmetro do furo em relação ao diâmetro do parafuso é 2 mm superior no caso dos M16 e 1 mm no caso dos M12. Comparando os dois tipos de parafusos, a fase de ajustes é superior para os parafusos CE, pois para além de haver um ajuste do corpo do parafuso em relação ao furo, há também um ajuste da cabeça do parafuso ao escareado do tubo nestes parafusos, que é mais acentuado devido às faces inclinadas da cabeça.

Na fase elástica, os parâmetros mais importantes a avaliar são a rigidez da ligação e o ponto de início da cedência, definido pela força de cedência F_y e pela deformação de cedência e_y . Este ponto foi determinado pelo método recomendado pelo ECCS (1986), sendo definido graficamente pela intersecção de uma reta tangente à curva na fase elástica com uma reta de declive de 10% da inclinação da reta anterior, como se ilustra na Figura 3.30.

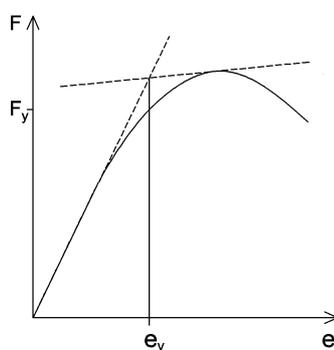


Figura 3.30 – Esquema para a identificação do ponto de início da cedência

A rigidez pode ser calculada conhecendo o declive da reta de regressão linear que melhor se ajusta ao desenvolvimento da curva nesta fase. No Quadro 3.4 são apresentados os valores de rigidez calculados para as curvas numéricas e para as curvas experimentais, que permitem fazer uma avaliação quantitativa da aproximação das duas curvas na fase elástica.

Quadro 3.4 – Valores de rigidez dos modelos

Modelo	Numérico [kN m ⁻¹]	Experimental [kN m ⁻¹]	% Erro
M12 CC t5	98391	104130	5,83
M12 CE t5	130880	103410	20,99
M16 CC t5	208430	100210	51,92
M16 CE t5	115200	86977	24,50
M16 CC t8	224440	123285	45,07
M16 CE t8	138010	90729	34,26

Pelos valores apresentados é seguro afirmar que a rigidez dos modelos numéricos é superior à dos modelos experimentais, sendo que os resultados numéricos obtidos que mais se aproximam dos resultados experimentais foram obtidos para os modelos M12 t5.

Comparando as várias configurações estudadas, tanto nos modelos numéricos como experimentais, a rigidez das ligações com parafusos M16 CE é ligeiramente inferior à rigidez das ligações com M16 CC. No que diz respeito à calibração, nos modelos com parafusos M16 CE houve também uma melhor aproximação dos valores de rigidez obtidos numericamente aos valores experimentais, quando comparados com os seus homólogos de cabeça circular.

Quanto ao início da cedência, podemos observar que esta ocorre nos modelos M12 t5 para valores de deslocamento da curva numérica e da curva experimental muito próximos. Nos modelos M16 t5 também se verifica esta tendência, embora com menor aproximação, ao contrário dos modelos M16 t8, onde a cedência na curva numérica se inicia para deslocamentos muito inferiores aos registados na curva experimental.

A rigidez e o início da cedência estão maioritariamente relacionados com a área de contacto entre os parafusos e a chapa interior. O erro obtido nestes parâmetros deverá estar relacionado com o facto de ser ter adotado uma área de contacto fixa, quando é sabido que esta varia com a força aplicada. Por esta razão, em casos em que a área de contacto admitida é superior à área efetivamente em contacto durante o ensaio experimental, o que é mais provável acontecer nas configurações M16 t5 e M16 t8, o modelo numérico poderá ter uma rigidez superior e um início de cedência para deslocamentos inferiores, devido aos esforços transmitidos entre os elementos em contacto serem superiores.

Iniciada a cedência, a curva entra em regime plástico, onde há uma diminuição da rigidez, visível pelo aumento do deslocamento para um menor aumento de carga. É nesta fase que se atinge a carga máxima, antes de se iniciar a plastificação das secções e consequente rotura pela componente mais fraca. Um dos critérios da calibração que teve especial impacto na fase plástica e na rotura dos modelos foi a definição das curvas tensão-extensão do material com base nos ensaios de caracterização. No Quadro 3.5 apresentam-se os valores obtidos para a carga máxima dos modelos numéricos e experimentais.

Quadro 3.5 – Valores de carga máxima

Modelo	Numérico [kN]	Experimental [kN]	% Erro
M12 CC t5	352,65	351,12	0,43
M12 CE t5	334,54	330,30	1,27
M16 CC t5	364,21	351,97	3,36
M16 CE t5	375,55	372,22	0,89
M16 CC t8	633,18	621,16	1,90
		634,16	0,15
M16 CE t8	633,34	616,59	2,64
		621,05	1,94

Os modelos numéricos aproximam-se com relativa precisão, ainda que por excesso, dos valores de carga máxima obtidos experimentalmente. Atingida a carga máxima da ligação, a rotura inicia-se para os valores de deslocamento indicados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Valores do deslocamento no início da rotura

Modelo	Numérico [mm]	Experimental [mm]	% Erro
M12 CC t5	8,0	8,3	3,75
M12 CE t5	9,0	8,4	6,67
M16 CC t5	10	11,2	12,00
M16 CE t5	11,1	13	17,12
M16 CC t8	12,8	16,8	31,25
		14,7	14,84
M16 CE t8	13,0	11,8	9,23
		11,5	11,54

Os modos de rotura obtidos numericamente coincidem com os modos de rotura obtidos por via experimental, como se pode observar nas Figuras 3.31 a 3.36, através da deformada do modelo na rotura e das tensões equivalentes de von Mises instaladas na peça.

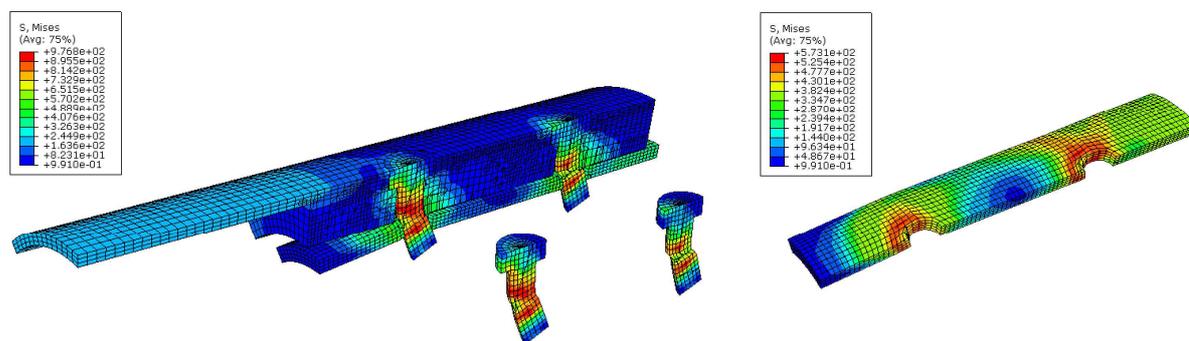


Figura 3.31 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M12 CC t5

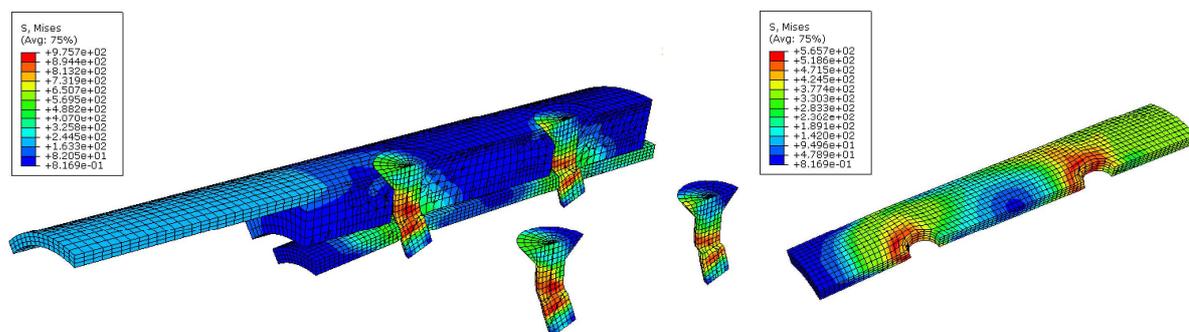


Figura 3.32 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M12 CE t5

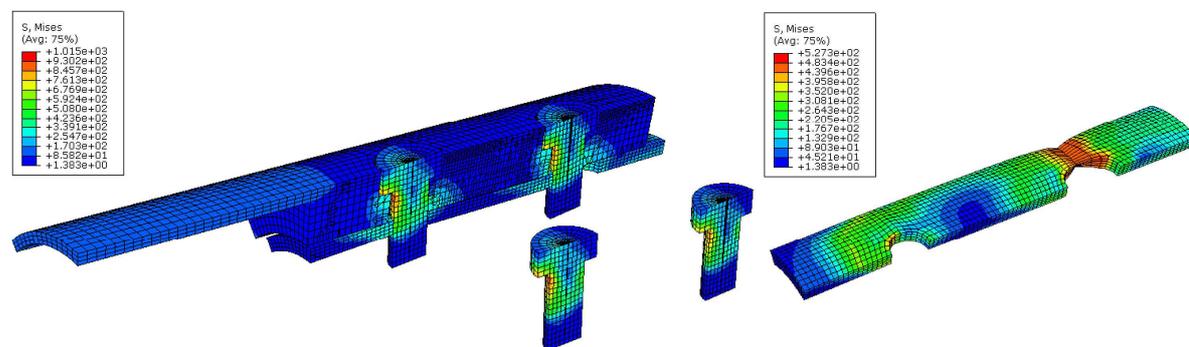


Figura 3.33 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M16 CC t5

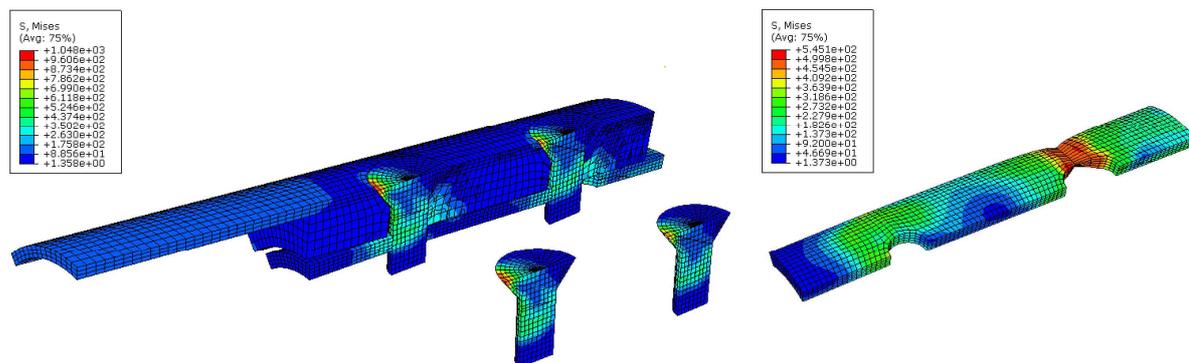


Figura 3.34 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M16 CE t5

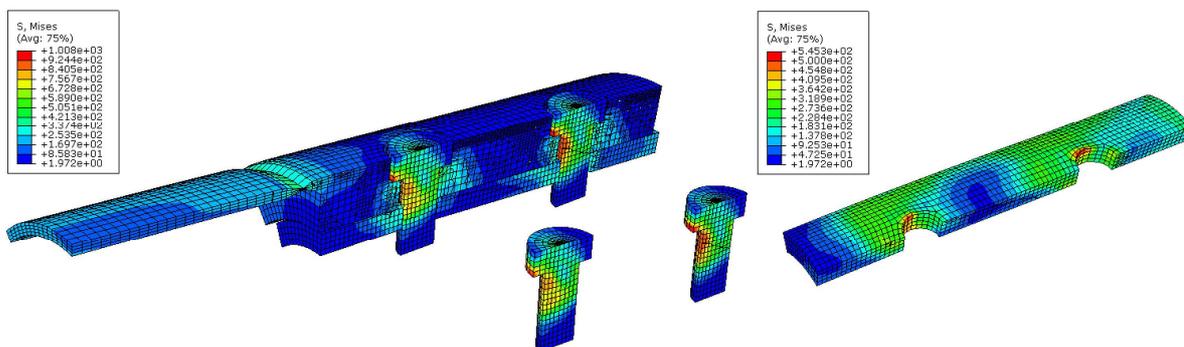


Figura 3.35 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M16 CC t8

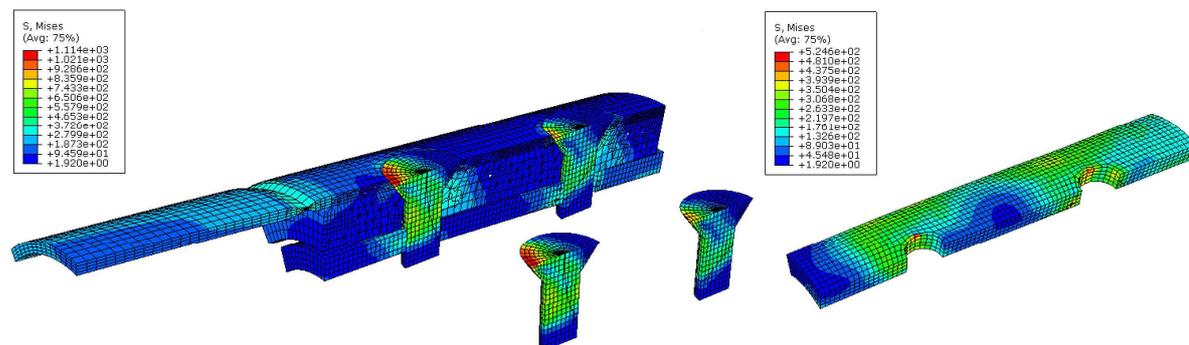


Figura 3.36 – Tensões equivalentes de von Mises na rotura do modelo M16 CE t8

4 ESTUDO PARAMÉTRICO

4.1 Introdução

No âmbito do estudo em que este trabalho se insere, verificou-se que para os parafusos trabalharem ao corte, com um comportamento semelhante ao de uma ligação ao corte convencional com parafusos de cabeça saliente, seria necessário utilizar na zona da ligação um tubo mecânico de espessura elevada. Esta constatação foi confirmada com os ensaios realizados por Silva (2014) e Vasconcelos (2015), onde se usou um tubo com 20 mm de espessura, o que corresponde a cerca de 3 vezes a altura da cabeça dos parafusos.

Com base nos modelos numéricos desenvolvidos e calibrados no Capítulo 3, foi realizado um estudo paramétrico com o objetivo compreender a influência da espessura do tubo mecânico no comportamento da ligação, pretendendo-se obter uma estimativa da espessura mínima que o tubo mecânico deve ter para que o comportamento da ligação não seja influenciado pela rotação do parafuso, ou seja, para que a ligação apresente um comportamento típico de uma ligação ao corte convencional.

Desta forma, o estudo paramétrico teve como suporte os modelos com modo de rotura por corte dos parafusos, M12 CC t5 e M12 CE t5, que passam a ser designados neste capítulo por M12 CC - 20 e M12 CE - 20 ou modelos de calibração. As características destes modelos, descritas anteriormente, foram mantidas constantes, tendo sido apenas efetuada a variação geométrica da espessura do tubo mecânico de 20 a 8 mm. No Quadro 4.1 e no Quadro 4.2 apresentam-se as características geométricas de todas as configurações usadas no estudo paramétrico.

Quadro 4.1 – Resumo das configurações paramétricas com parafusos M12 CC

Nome do modelo	Diâmetro do parafuso	Classe do parafuso	Tipo de parafuso	Espessura das chapas interiores	Perfil	Tubo mecânico
M12 CC - 8	M12	8.8	Cabeça Circular	5,3 mm	120 mm x 4 mm	120 mm x 8 mm
M12 CC - 9						120 mm x 9 mm
M12 CC - 10						120 mm x 10 mm
M12 CC - 12						120 mm x 12 mm
M12 CC - 14						120 mm x 14 mm
M12 CC - 16						120 mm x 16 mm
M12 CC - 18						120 mm x 18 mm
M12 CC - 20						120 mm x 20 mm

Quadro 4.2 – Resumo das configurações paramétricas com parafusos M12 CE

Nome do modelo	Diâmetro do parafuso	Classe do parafuso	Tipo de parafuso	Espessura das chapas interiores	Perfil	Tubo mecânico
M12 CE - 8	M12	8.8	Cabeça de Embeber	5,3 mm	120 mm x 4 mm	120 mm x 8 mm
M12 CE - 9						120 mm x 9 mm
M12 CE - 10						120 mm x 10 mm
M12 CE - 12						120 mm x 12 mm
M12 CE - 14						120 mm x 14 mm
M12 CE - 16						120 mm x 16 mm
M12 CE - 18						120 mm x 18 mm
M12 CE - 20						120 mm x 20 mm

4.2 Análise dos resultados

Os resultados do estudo paramétrico são representados através das curvas força-deslocamento da Figura 4.1 e Figura 4.2.

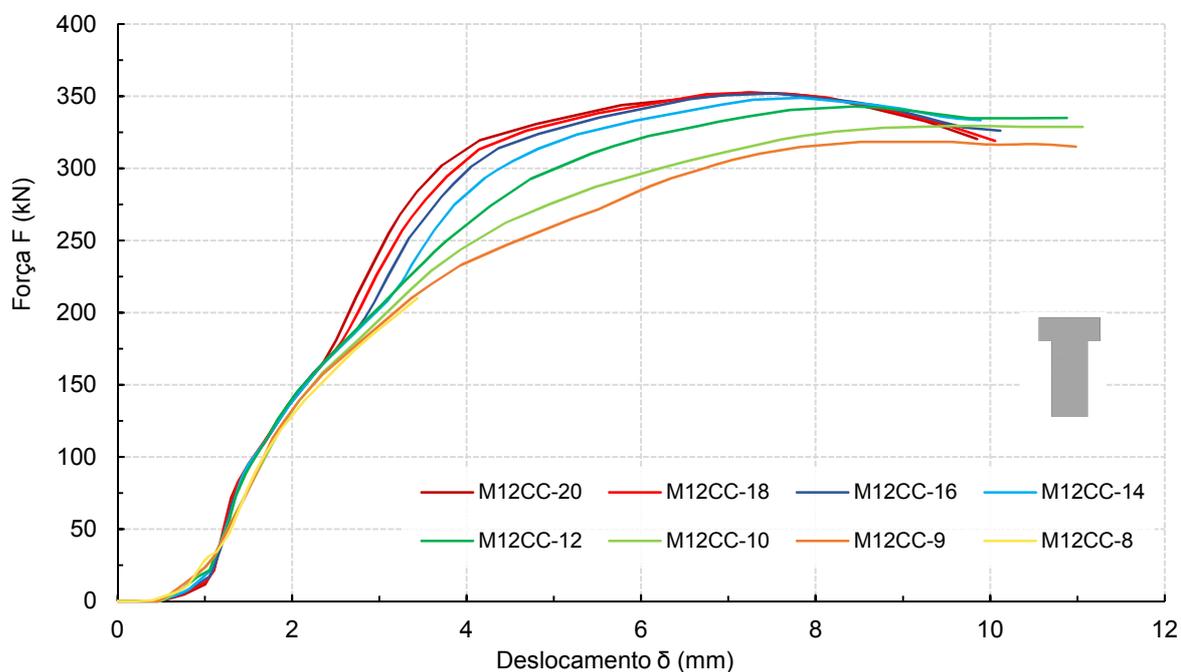


Figura 4.1 – Curvas força-deslocamento dos modelos M12 CC

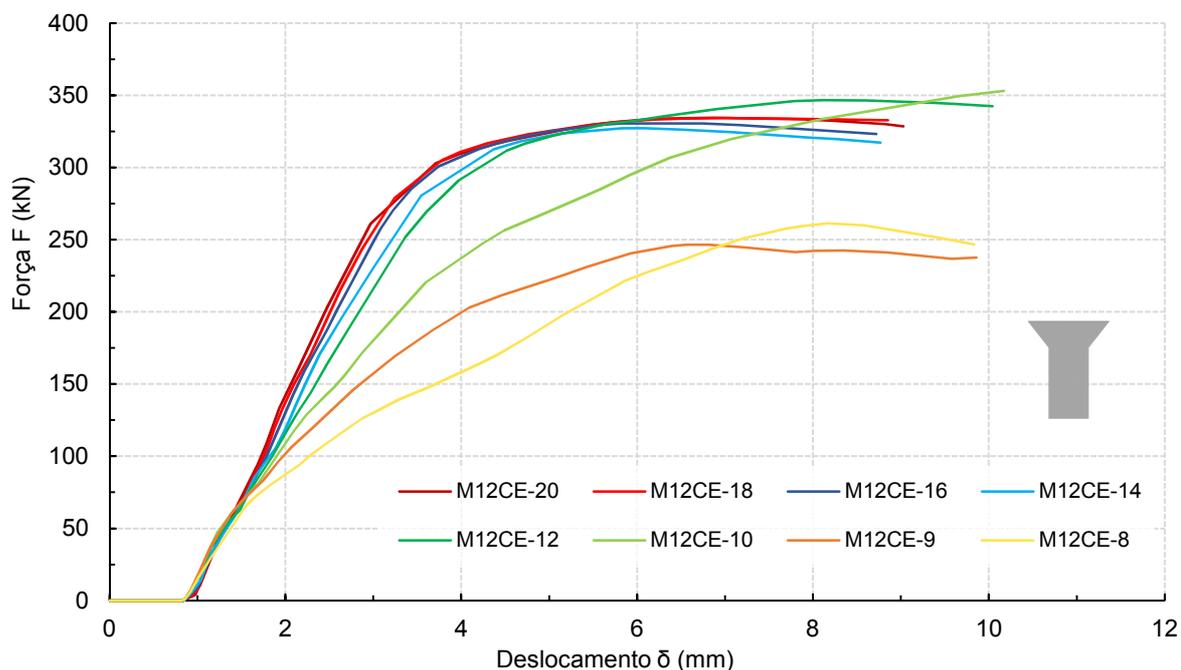


Figura 4.2 – Curvas força-deslocamento dos modelos M12 CE

Com base numa avaliação qualitativa da Figura 4.1 e da Figura 4.2, verifica-se que a perda de rigidez, muito dependente da rotação do parafuso, começa a acentuar-se a partir de espessuras da ordem de 12 a 14 mm.

Na Figura 4.1 destaca-se o desenvolvimento da curva do modelo M12 CC – 8, que termina para um deslocamento de cerca de 3,4 mm, bastante inferior ao deslocamento observado para a rotura dos restantes modelos. Esta particularidade do modelo acontece devido ao facto da altura da cabeça do parafuso ser de 7 mm e a espessura do tubo ser de 8 mm, o que resulta numa espessura de tubo na zona do escareado onde apoia a cabeça do parafuso de apenas 1 mm, sendo que esta zona rapidamente cede por esmagamento. No modelo M12 CE – 8 este fenómeno não acontece devido à geometria da cabeça do parafuso, que tem faces inclinadas que não assentam no tubo. Na Figura 4.3 pode-se observar em pormenor a zona do escareado do modelo M12 CC – 8.

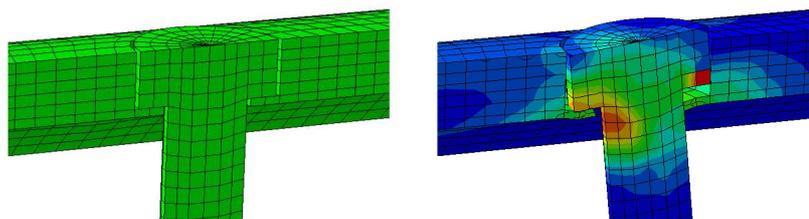


Figura 4.3 – Pormenor da zona do escareado no modelo M12 CC - 8

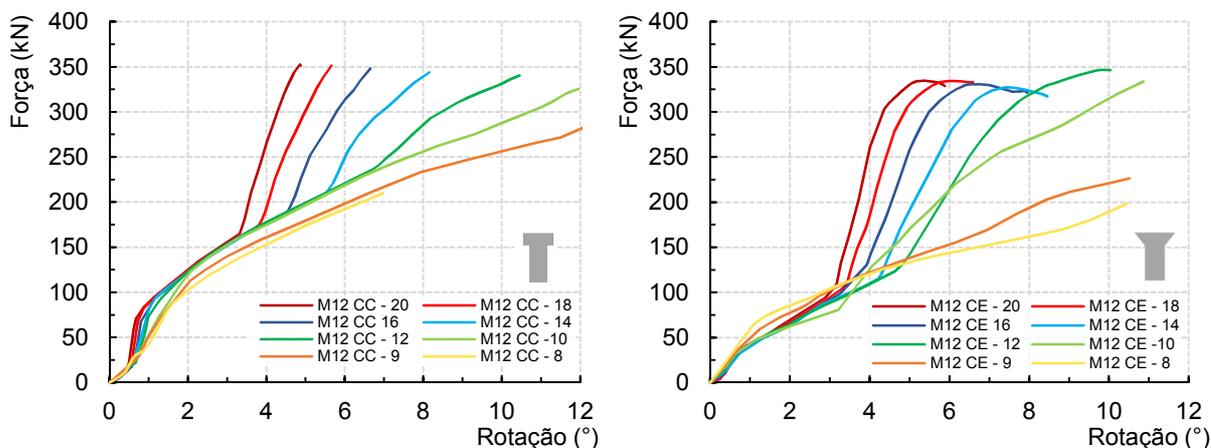
De forma a proceder-se a uma avaliação quantitativa da influência da espessura do tubo no comportamento da ligação, foram identificados os valores de carga para um deslocamento de referência de 3,8 mm e 3,4 mm, para os modelos com parafusos M12 CC e M12 CE respetivamente. Estes valores de deslocamento de referência correspondem ao deslocamento de cedência e_y dos modelos M12 CC- 20 e M12 CE – 20, definidos conforme descrito na secção 3.4. Com base na força F_y dos modelos de calibração, foi calculada a redução percentual da carga nas várias configurações do estudo, cujos valores se apresentam no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Variação da força no deslocamento de referência

Modelo	Força (kN)	ΔF (%)	Modelo	Força (kN)	ΔF (%)
M12 CC - 20	305,35	-	M12 CE - 20	285,45	-
M12 CC - 18	295,81	-3,23%	M12 CE - 18	286,43	0,35%
M12 CC - 16	285,83	-6,83%	M12 CE - 16	283,11	-0,83%
M12 CC - 14	270,10	-13,05%	M12 CE - 14	267,06	-6,88%
M12 CC - 12	251,22	-21,55%	M12 CE - 12	254,26	-12,26%
M12 CC - 10	237,94	-28,33%	M12 CE - 10	207,10	-37,83%
M12 CC - 9	227,75	-34,08%	M12 CE - 9	175,60	-62,56%
M12 CC - 8	-	-	M12 CE - 8	141,90	-101,03%

Como critério de avaliação do estudo paramétrico, estabeleceu-se que o comportamento da ligação é satisfatório para as configurações que apresentem um valor de redução percentual da carga no deslocamento de referência até 10%. Desta forma, pelos valores apresentados no Quadro 4.3, podemos concluir que a ligação apresenta um comportamento semelhante a uma ligação ao corte convencional para espessuras do tubo de 16 mm e 14 mm nos modelos com parafusos M12 CC e M12 CE, respetivamente, que são espessuras da ordem de grandeza de duas vezes a altura da cabeça do parafuso.

Uma vez que a rotação do parafuso em torno de um eixo perpendicular ao eixo do tubo é o parâmetro mais diretamente relacionado com o comportamento do parafuso ao corte, efetuou-se uma quantificação aproximada dos valores de rotação, relacionando-os com a força aplicada ao longo do ensaio numérico. As curvas força-rotação são apresentadas na Figura 4.4.



a) Modelos M12 CC

b) Modelos M12 CE

Figura 4.4 – Curvas força-rotação

Um avaliação, ainda que qualitativa, destas curvas permite verificar que quando as espessuras do tubo de ligação se aproximam de valores da ordem de grandeza da cabeça, o comportamento da ligação degrada-se, havendo uma maior rotação para valores inferiores de força. Para ilustrar graficamente a rotação dos parafusos nos modelos do estudo paramétrico, nas Figuras 4.5 e 4.6 apresenta-se a deformada de cada modelo numérico na rotura, obtida através do programa *Abaqus*.

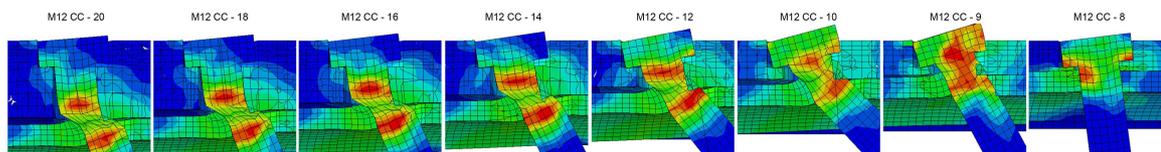


Figura 4.5 – Rotação dos parafusos na rotura nos modelos M12 CC

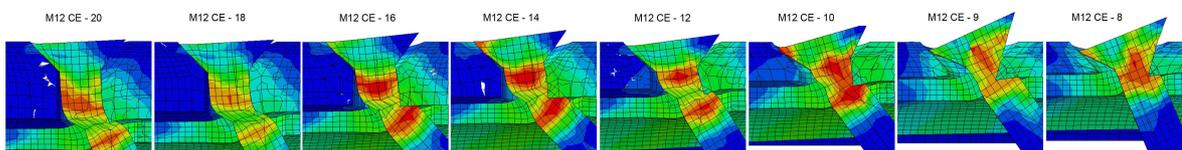


Figura 4.6 – Rotação dos parafusos na rotura nos modelos M12 CC

5 AVALIAÇÃO REGULAMENTAR

5.1 Introdução

Para a previsão analítica da resistência da ligação proposta no âmbito do estudo em que se insere esta dissertação, será aplicada a metodologia de cálculo para ligações aparafusadas ao corte convencionais preconizada pelo Eurocódigo 3 – Parte 1-8.

Uma vez que a configuração desta ligação foi concebida e aperfeiçoada para que o seu comportamento se aproximasse do comportamento de uma ligação com parafusos ao corte convencional, é previsível que, apesar da configuração geométrica da ligação ser diferente da utilizada na calibração das formulações do Eurocódigo, se consiga determinar o comportamento e resistência da ligação em estudo através da regulamentação vigente.

Para esse feito, considerou-se que a ligação estudada se insere na Categoria A (ligação aparafusada ao corte resistente ao esmagamento), segundo o Eurocódigo 1 Parte 1-8. A metodologia de cálculo apresentada para este tipo de ligações foi desenvolvida para ligações em que o aperto é feito através de porca, o que não se verifica na ligação em estudo. Nas ligações ao corte convencionais, o parafuso mantém-se exclusivamente ao corte porque a sua rotação é restringida pelas forças de alavanca perpendiculares às chapas, que se mobilizam sob a cabeça e sob a porca como se pode observar na Figura 5.1.

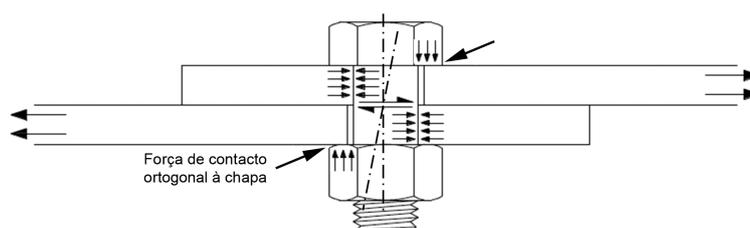


Figura 5.1 – Funcionamento de uma ligação ao corte convencional

No caso de ausência de porca e/ou o parafuso ser de cabeça de embeber, este mecanismo é menos eficaz, existindo alguma rotação do parafuso que com o aumento da deformação, permite que a cabeça fique ancorada na chapa e o parafuso passe a estar sujeito a esforços de tração, o que se traduz em geral numa perda de rigidez axial da ligação. No caso da ligação proposta, este problema foi minimizado através do aumento da espessura do tubo mecânico, resultado das sucessivas iterações à sua configuração.

Quando uma ligação convencional com parafusos ao corte é solicitada à tração, mesmo que a ligação seja considerada não pré-esforçada, é possível observar um aumento de carga sem aumento de deslocamento, devido ao atrito estático residual entre as chapas, gerado pelo aperto dos parafusos. Finalizada esta fase, os parafusos ajustam-se aos furos das chapas, eliminando as folgas existentes, começando a haver um aumento gradual das tensões nos elementos, acompanhado por um aumento de deformação, devido à propagação de esforços entre os elementos. A rotura da ligação ocorre durante a fase plástica, na componente ou na combinação de componentes mais fraca da ligação. Os modos de rotura possíveis são o modo de rotura por corte dos parafusos, por esmagamento da chapa, por rotura da chapa na secção útil reduzida devido aos furos ou por rotura da secção bruta da chapa à tração, como se ilustra na Figura 5.2.

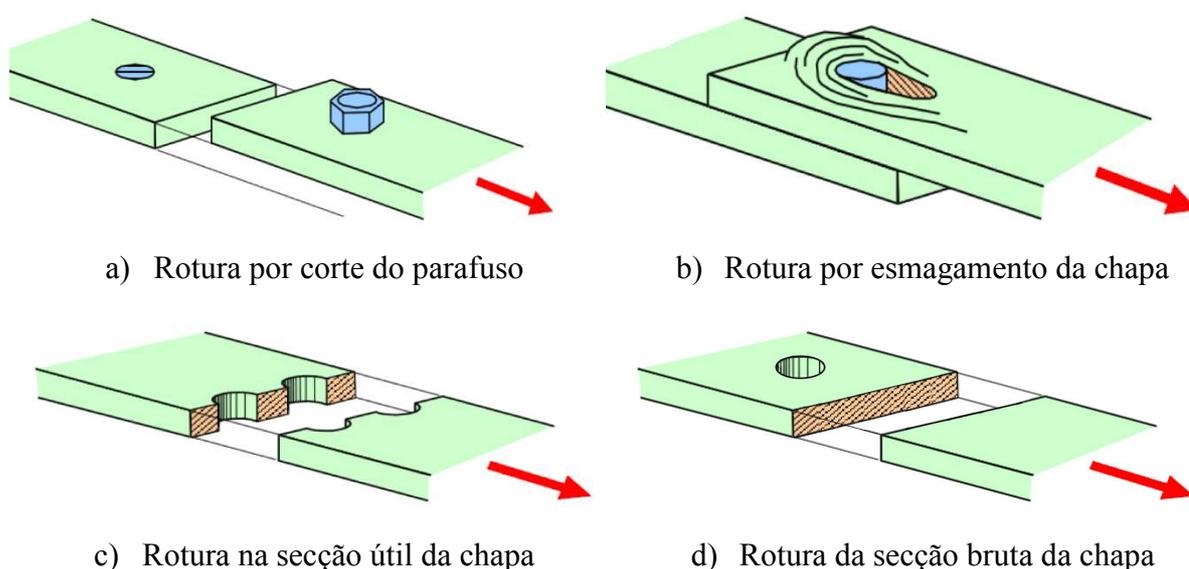


Figura 5.2 – Modos de rotura de uma ligação ao corte convencional (Adaptado de Soares, 2012)

5.2 Formulação regulamentar

De acordo com o Eurocódigo 3 – Parte 1-8, e de acordo com o descrito na secção anterior, a resistência de uma ligação ao corte convencional é obtida conhecendo a resistência da componente mais fraca da ligação, podendo esta ser:

- Parafusos ao corte;
- Esmagamento da chapa;
- Rotura da chapa pela secção útil;
- Secção bruta em tração;
- Resistência da soldadura.

No caso da ligação estudada, a verificação da resistência da soldadura foi desprezada uma vez que a ligação soldada entre o perfil tubular e o tubo mecânico foi realizada com penetração total e com elevada espessura, o que faz prever que a sua resistência seja significativamente superior à resistência das outras componentes e que, conseqüentemente, este não seja um modo de rotura previsível. Os modos de rotura associados ao tubo mecânico (esmagamento e rotura pela secção útil) também não foram tidos em conta na verificação da resistência da ligação, uma vez que o tubo apresenta uma espessura muito superior à espessura da chapa e do perfil e portanto não é esperado que este elemento seja condicionante na resistência da ligação.

Para ligações aparafusadas, o Eurocódigo 3 – Parte 1-8 estabelece distâncias mínimas aos bordos e extremidades das peças, e entre eixos dos parafusos, que foram verificadas para a ligação em estudo atendendo à Figura 5.3 e através das equações (5.1), (5.2) e (5.3), onde d_0 é o diâmetro do furo.

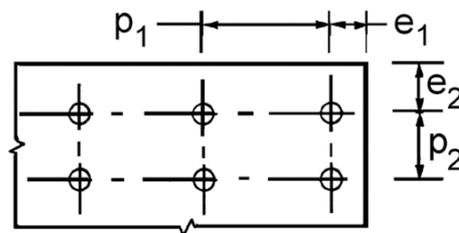


Figura 5.3 – Símbolos para as distâncias entre os eixos dos furos (CEN, 2005b)

$$e_1 = e_2 = 1,2 \cdot d_0 \quad (5.1)$$

$$p_1 = 2,2 \cdot d_0 \quad (5.2)$$

$$p_2 = 2,4 \cdot d_0 \quad (5.3)$$

Para o cálculo resistência da componente mais condicionante da ligação, serão determinados os valores de resistência dos parafusos ao corte, da chapa interior ao esmagamento e à rotura pela secção útil e da secção bruta transversal do perfil à tração, através das equações que se apresentam nos seguintes pontos.

- Valor de cálculo da resistência ao corte do parafuso, por plano de corte:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (5.4)$$

Em que:

α_v - fator de redução definido no Quadro 3.4 do EC3-1-8;

f_{ub} - tensão última do parafuso;

γ_{M2} - coeficiente de segurança parcial para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação;

A_s - área da secção resistente do parafuso.

- Valor de cálculo da resistência ao esmagamento da chapa interior, por parafuso

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (5.5)$$

Em que:

k_1 - fator de redução definido em na Quadro 3.4 do EC3-1-8;

α_b - um fator de redução definido em na Quadro 3.4 do EC3-1-8;

f_u - tensão última da chapa interior;

d - diâmetro nominal do parafuso;

t - espessura do chapa interior;

γ_{M2} - coeficiente de segurança parcial para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação.

- Valor de cálculo do esforço normal resistente último da secção útil da chapa interior

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.6)$$

Em que:

A_{net} - área útil da secção transversal da chapa interior;

f_u - tensão última da chapa interior;

γ_{M2} - coeficiente de segurança parcial para a resistência à rotura de secções transversais tracionadas em zonas com furos de ligação.

- Valor de cálculo do esforço normal resistente plástico da secção bruta do perfil tubular

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.7)$$

Em que:

A - área bruta da secção transversal do perfil tubular;

f_y - tensão de cedência do perfil tubular;

γ_{M0} - coeficiente de segurança parcial para a resistência à rotura de secções transversais de qualquer classe.

5.3 Comparação de resultados

No Quadro 5.1 constam os resultados obtidos de acordo com a formulação apresentada, para a resistência das várias componentes da ligação.

Quadro 5.1 – Valores analíticos de resistência das componentes da ligação

Modelo	Resistência dos parafusos ao corte	Resistência da chapa interior ao esmagamento	Resistência da chapa interior à rotura pela A_{net}	Resistência da secção transversal do perfil à tração
	$F_{v,Rd}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	$N_{u,Rd}$ [kN]	$N_{pl,Rd}$ [kN]
M12 CC t6	329,99	670,05	408,29	582,80
M12 CE t6	299,26			
M16 CC t6	751,15	661,78	370,29	
M16 CE t6	749,90			
M16 CC t8	751,15	1098,09	614,08	
M16 CE t8	749,90			

A resistência das componentes da ligação foi calculada tendo por base um fator de segurança igual à unidade e os valores médios das tensões de cedência e tensões últimas apresentados no Quadro 3.2 e no Quadro 3.3. No cálculo da componente da resistência dos parafusos ao corte, considerou-se o fator de redução α_v igual a 0,50 para os parafusos de classe 8.8, uma vez que a sua tensão última f_{ub} se encontra no intervalo de tensão considerado para a classe 10.9.

No Quadro 5.2 é feita uma comparação entre os valores de resistência obtidos numérica, experimental e analiticamente, cujo rácio é apresentado no Quadro 5.3.

Quadro 5.2 – Valores de resistência

Modelo	Experimental [kN]	Numérico [kN]	Analítico [kN]	Modo de Rotura
M12 CC t6	351,12	352,65	329,99	Corte do parafuso
M12 CE t6	330,30	334,54	299,26	
M16 CC t6	351,97	364,21	370,29	Rotura da chapa interior
M16 CE t6	372,22	375,55	370,29	
M16 CC t8	621,16	633,18	582,80	Rotura da secção transversal do perfil
	634,16			
M16 CE t8	616,59	633,34	582,80	
	621,05			

Quadro 5.3 – Rácio dos valores de resistência

Modelo	Rácio Experimental / Analítico	Rácio Experimental / Numérico	Rácio Numérico / Analítico
M12 CC t6	1,06	1,00	1,07
M12 CE t6	1,10	0,99	1,12
M16 CC t6	0,95	0,97	0,98
M16 CE t6	1,01	0,99	1,01
M16 CC t8	1,07	0,98	1,09
	1,09	1,00	
M16 CE t8	1,06	0,97	1,09
	1,07	0,98	

De acordo com os valores apresentados, é possível afirmar de uma forma geral que tanto o cálculo numérico como analítico da ligação reproduzem resultados com relativa aproximação aos resultados experimentais.

As forças máximas obtidas nos ensaios são sempre superiores (exceto num caso) às estimativas analíticas, o que permite concluir que com base neste estudo a formulação do EC3-1-8 pode ser aplicada na previsão da resistência da ligação proposta no âmbito deste estudo.

Os resultados numéricos e os resultados experimentais são bastante próximos, o que revela que o estudo numérico foi bem elaborado, sendo possível reproduzir com sucesso o comportamento da ligação estudada através dos modelos numéricos, o que legitima os resultados obtidos através da variação paramétrica.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação constituiu a etapa final de um estudo mais alargado, cujo objetivo é a conceção de uma ligação de emenda entre perfis de secção tubular que alie um bom desempenho estrutural a um bom desempenho estético.

Para tal foi desenvolvido um conjunto de modelos numéricos de elementos finitos, devidamente calibrados através de resultados de ensaios experimentais, que reproduziram de forma eficaz o comportamento e os modos de rotura experimentais da ligação em estudo.

Com base nos trabalhos previamente desenvolvidos, foi concluído que para que a ligação proposta atingisse os objetivos de funcionamento delineados, era fundamental introduzir um troço de um tubo mecânico de elevada espessura na zona de emenda, para assegurar o adequado desempenho do parafuso.

Desta forma, e reforçando a qualidade da modelação numérica produzida, foi possível estudar uma variação paramétrica da espessura do tubo mecânico, considerada o parâmetro mais importante para o comportamento geral da ligação.

Através do estudo numérico e paramétrico desenvolvido é possível afirmar que o troço do tubo mecânico deve ter uma espessura não inferior a cerca de duas vezes a altura da cabeça do parafuso. Nesta condição, pode também concluir-se que a formulação regulamentar prevista no Eurocódigo 3 Parte 1-8 para ligações ao corte convencionais, é aplicável à tipologia da ligação proposta neste estudo.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Apesar de este trabalho ser considerado a etapa final de um estudo de conceção e otimização de uma ligação de emenda aparafusada entre perfis tubulares, é possível propor, ainda que com outros objetivos, os seguintes tópicos para desenvolvimentos futuros:

- Verificar a influência da rigidez da ligação no comportamento global de uma estrutura em que esta se insere;
- Melhorar o critério de deformação considerado a partir da análise de uma estrutura completa, onde se insira a ligação em estudo;
- Estudar emendas entre perfis de secção tubular quadrada e/ou retangular;
- Realizar um estudo paramétrico com a variação de outros parâmetros como o diâmetro, tipo e número de parafuso, espaçamento entre furos e o diâmetro do perfil tubular a emendar;
- Alargar o estudo a outras classes de aço;
- Estudar o comportamento da ligação quando sujeita à flexão;
- Estudar o comportamento da ligação quando sujeita a ação cíclica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus/CAE Documentação online – Versão 6.13., Dassault Systèmes, 2013.

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

CEN (2005a). “EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN 1993-1-1).

CEN (2005b). “EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-8: Design of joints”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN 1993-1-8).

CEN (2006a). “EN 10210-1:2006, Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain structural steels. Technical delivery requirements”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN 10210-1:2008).

CEN (2006b). “EN 10219-1:1997, Cold formed welded structural sections of non-alloy and fine grain steels. Technical delivery requirements”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN 10219-1:2009).

CEN (2009). “EN ISO 6892-1:2009, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN ISO 6892-1:2012).

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

Dias da Silva, V. (2002). “Introdução à Análise Não-Linear de Estruturas”. Material de apoio à disciplina de Análise Não-Linear de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

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

Dutta, D., Wardenier, J., Yeomans, N., Sakae, K., Bucak, Ö. e Packer, J.A. (1998). “Design Guide for Fabrication, Assembly and Erection of Hollow Section Structures”. CIDECT e Verlag TÜV Rheinland, Colónia, Alemanha. ISBN 3-8249-0443-8.

ECCS (1986). “Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads”. First Edition. European Convention for Constructional Steelwork, Bruxelas, Bélgica.

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

Flanagan, D. P. e Belytschko, T. (1981). “A Uniform Strain Hexahedron and Quadrilateral with Orthogonal Hourglass Control,” International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 17, pp. 679–706, 1981.

Freitas, P. (2013). “Configurações inovadoras de ligações de emenda de barras metálicas de secção tubular”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

HISTWIN (2012). “HISTWIN - High-strength steel for wind turbine“. Relatório Final, RFCS, União Europeia.

Jackson, A.A. (1998), “The Development of Steel Framed Buildings in Britain 1880-1905”. Construction History, Vol. 14, pp. 21-40.

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

Lindapter@. <http://www.lindapter.com/Products/Cavity_Fixings/2>. Acesso em: 4 de Abril de 2015.

Packer, J.A. e Henderson, J.E. (1997). “Hollow Structural Section: Connections and Trusses – a Design Guide”. CISC, Ontário, Canadá. ISBN 0-88811-086-3 (2ª edição)

Quintin Lake@. <<http://quintinlake.photoshelter.com/image/I0000gVEEPJUxJEc>> Acesso em: 9 de Abril de 2015.

Santha Kumar, A.R. e Satish Kumar, S.R. (2010). “Design of Steel Structures I”. IIT Madras, Índia.

Silva, J. (2014). “Study of splice bolted connections in truss steel structures with hollow sections”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Simões da Silva, L. e Santiago, A. (2003). “Manual de Ligações Metálicas”. CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, Coimbra.

Simões, R., Jordão, S. e Freitas, P. (2013). “Avaliação do comportamento de ligações de emenda entre perfis tubulares”. Ata do IX Congresso de Construção Metálica e Mista & I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto.

Simões, R., Jordão, S. e Silva, J. (2014). “Comportamento experimental de configurações inovadoras de ligações de emenda em perfis tubulares”. Ata do 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, UA, Aveiro.

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

V&M do Brasil (2008). “Imaginação e inspiração: Coletânea de estruturas tubulares”. Tamóios, Belo Horizonte, Brasil. ISBN 978-85-98154-03-9

Vasconcelos, B. (2015). “Análise Experimental de Ligações de Emenda Aparafusadas Inovadoras entre Perfis de Secção Tubular”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Vieira, R.C. (2014). “Análise Numérica e Experimental de Ligações Tubulares de Aço do tipo Luva parafusada”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Vieira, R.C., Vieira, R.F., Requena, J. e Araújo, A. (2011). “Numerical Analysis of CHS Bolted Sleeve Connections”. Ata do EUROSTEEL 2011 - 6th European Conference on Steel and Composite Structures, BUTE, Budapeste.

Wardenier, J. (1982). “Hollow Section Joints”. Delft University Press, Delft, Países Baixos. ISBN 90-6275-084-2.

Wardenier, J., Packer, J.A., Zhao, X.-L. e Vegte, G.J. van der (2010). “Hollow Sections In Structural Applications”. CIDECT, Genebra, Suíça. ISBN 978-90-72830-86-9.

Williams, J., Anley, R., Nash, D. E Gray, T. (2009). “Analysis of externally loaded bolted joints: analytical, computational and experimental study”. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, pp. 420-427.

Wriggers, P. (2002). “Computational Contact Mechanics”. Wiley, England. ISBN 0-471-49680-4.