



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

# **Análise Experimental 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

**Bruno Filipe Pereira Aguiar Vasconcelos**

Orientador

**Professora Doutora Sandra Filomena da 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, Julho, 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Para a realização e conclusão desta dissertação foi muito importante o contributo e ajuda de muitas pessoas, a quem deixo aqui algumas palavras de agradecimento.

À Professora Doutora Sandra Filomena da Silva Jordão Alves e ao Professor Doutor Rui António Duarte Simões pela disponibilidade e apoio fornecido durante a realização deste trabalho.

Ao meu pai Domingos e à minha mãe Maria José pelo apoio que sempre me deram e porque sem eles não poderia estar neste curso.

A toda a minha família. Ao meu avô José Joaquim, à minha avó Maria Helena, à minha avó Bernardina. Ao meu já falecido avô José Teodoro que sempre demonstrou um enorme orgulho em ter um neto futuro engenheiro.

Aos funcionários de Departamento de Engenharia Civil e LEMEC, Luís Gaspar, Sr. David Rodrigues e Eng.º Ilídio Santos pela importante ajuda dada na preparação e realização dos ensaios experimentais.

Aos meus colegas e amigos, especialmente ao Carlos Neto, pela amizade e apoio demonstrados ao longo deste trabalho e destes anos de curso.

À ACIV, pelo apoio financeiro que permitiu adquirir o material necessário para os ensaios.

## RESUMO

As ligações presentes em estruturas metálicas são elementos que exercem grande influência no comportamento global da estrutura, sendo que estas representam pontos críticos onde se dá a transmissão de esforços entre os vários elementos constituintes da estrutura metálica.

Estas ligações são idealmente pensadas de forma a facilitar o transporte e montagem das estruturas no local de obra e dividem-se em dois grupos distintos: as ligações soldadas e as ligações aparafusadas. Devido ao elevado grau de exigência da execução de ligações soldadas em obra, as ligações aparafusadas tornam-se muito mais vantajosas nessas condições, sendo o estudo deste tipo de ligações de grande importância.

O presente trabalho consiste no estudo experimental de ligações de emenda aparafusadas entre perfis tubulares de secção circular CHS sujeitos a esforços axiais. As ligações apresentam configurações inovadoras, de forma a apresentar uma alternativa às configurações aparafusadas tradicionais com estética pouco apelativa, sendo que as ligações são concebidas de forma a não existir qualquer tipo de soldadura em obra.

A caracterização do comportamento da ligação é feito experimentalmente através de ensaios das ligações até à rotura, incluindo a caracterização mecânica de todos os materiais utilizados, como perfis, chapas e parafusos. Os resultados obtidos dos ensaios permitirão obter conclusões acerca do desempenho estrutural das ligações e servirão para calibrar modelos numéricos a desenvolver numa fase posterior deste estudo.

Este trabalho surge no seguimento de estudos realizados anteriormente (tanto numéricos, como experimentais) e tem como objetivo a conceção de um novo tipo de ligação de emenda aparafusada entre perfis tubulares, que tenha em simultâneo um elevado desempenho estrutural e elevado valor estético, quando comparado com a tipologia convencional.

## **ABSTRACT**

Connections in steel structures are elements which have great influence in the global behavior of the structure, since they represent critical points where forces are transmitted between the various elements of the steel structure.

These connections are ideally conceived to facilitate transport and assembly on site and they are divided into two different groups: welded connections and bolted connections. Due to the high grade of execution requirements of welded connections when they are executed on site, the bolted connections are much more advantageous in those conditions. For this reason, is of great importance to study that type of connections.

The current work consists in the experimental study of bolted connections between Circular Hollow Sections (CHS) subjected to axial forces. The connections feature innovative configurations, so they can be seen as an alternative to the traditional non attractive configurations of splice bolted joints in tubes and they are designed with the purpose of not use welding during the assembly at the construction site.

The characterization of the connection behavior is done experimentally, by means of tests to failure, including the mechanical characterization of all material used, like plates and bolts. The results obtained from these tests will allow to draw conclusions about the structural performance of the connections and will be used to calibrate numerical models that will be developed in a later phase of investigation.

This work follows some previously developed studies (numerical and experimental) and it has as objective the design of a new type of bolted connection between tubular sections, which has simultaneously high structural performance and aesthetical value, when compared with the conventional typology.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.1.1	O aço na construção .....	1
1.1.2	Vantagens dos Perfis Tubulares .....	2
1.2	Objetivos e Procedimento .....	4
1.3	Organização e Conteúdos da Dissertação .....	8
2	ESTADO DO CONHECIMENTO .....	9
2.1	Introdução .....	9
2.2	Ligações de Emenda em Perfis Tubulares .....	9
2.2.1	Classificação das Ligações .....	9
2.2.2	Tipos de Parafusos .....	10
2.2.3	Ligação com Placa-Flange .....	13
2.2.4	Ligação Aparafusada com Chapas Laterais .....	14
2.2.5	Ligação Aparafusada com Tubos de Extremidades Achatadas .....	14
2.2.6	Ligação por Pregagem .....	15
2.2.7	Ligação Aparafusada por Atrito com Parafusos de Alta Resistência .....	16
2.2.8	Ligações Estudadas em Fases Anteriores de Desenvolvimento da Ligação em Estudo .....	16
2.3	Enquadramento Regulamentar .....	20
3	ESTUDO DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3 .....	22
3.1	Introdução .....	22
3.2	Comportamento Estrutural .....	22
3.3	Formulação da Parte 1-8 para Ligações Convencionais ao Corte .....	23
4	CAMPANHA EXPERIMENTAL .....	26
4.1	Introdução .....	26
4.2	Ensaio de Caracterização do Material .....	26
4.2.1	Aço .....	26
4.2.1.1	Introdução .....	26
4.2.1.2	Geometria e Esquema de Ensaio .....	27
4.2.1.3	Instrumentação .....	29
4.2.1.4	Estratégia de Carga .....	32
4.2.1.5	Resultados .....	32
4.2.2	Parafusos .....	40
4.2.2.1	Introdução .....	40

---

4.2.2.2	Geometria e Esquema de Ensaio .....	40
4.2.2.3	Instrumentação.....	43
4.2.2.4	Estratégia de Carga .....	45
4.2.2.5	Resultados .....	45
4.3	Ensaio das Ligações .....	50
4.3.1	Introdução .....	50
4.3.2	Geometria das Ligações .....	50
4.3.3	Preparação dos Modelos .....	52
4.3.4	Instrumentação .....	54
4.3.5	Ensaio.....	56
4.3.6	Resultados .....	57
5	ANÁLISE COMPARATIVA COM ETAPAS ANTERIORES DE DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO .....	67
6	CONCLUSÕES .....	69
7	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

### 1.1.1 O aço na construção

O uso do aço na construção tem vindo a crescer muito ao longo do tempo, principalmente nas últimas décadas. Isto tem vindo a acontecer devido às inúmeras possibilidades que o uso do aço traz para a construção, estando este normalmente associado a estruturas de elevado grau de complexidade e, ao mesmo tempo, a tempos de fabricação e montagem relativamente baixos, o que faz do aço um material de construção de eleição. As estruturas metálicas produzidas em aço estão também associadas ao conceito de inovação, como se pode comprovar nas inúmeras obras de grande valor arquitetónico que se podem encontrar fabricadas em aço hoje em dia, tais como grande parte dos novos estádios de futebol e algumas das mais impressionantes pontes existentes. Além disso, o aço é considerado como sendo um material sustentável na construção, podendo este ser reciclado e reutilizado quantas vezes seja necessário.

Todos estes fatores fazem com que o aço seja utilizado cada vez mais na construção, como se pode comprovar na Figura 1.1.

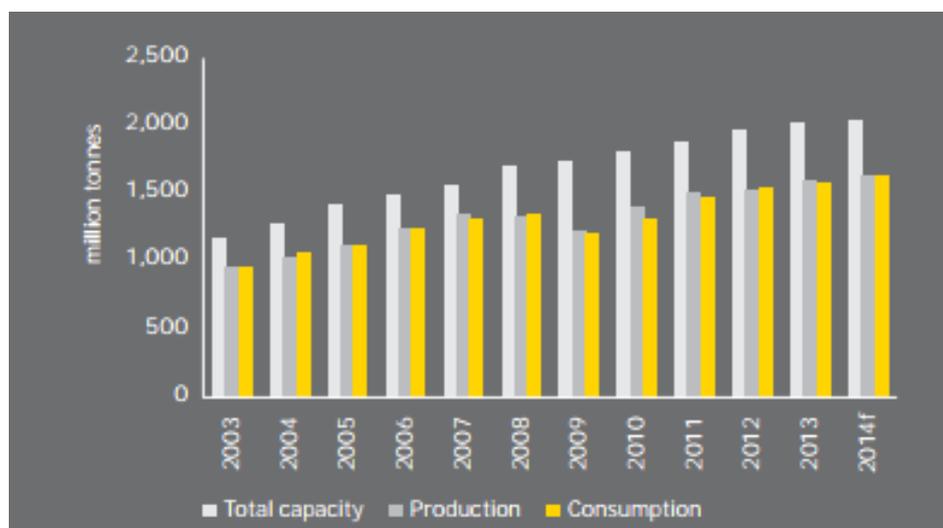


Figura 1.1 - Capacidade Total, Produção e Consumo de Aço (Global Steel, 2014)

### 1.1.2 Vantagens dos Perfis Tubulares

Durante a fase de projeto de todas as estruturas metálicas tem que se pensar previamente na escolha das secções que vão compor a estrutura final. Estas secções devem ser escolhidas com base no desempenho estrutural e estético que se pretende da estrutura, de forma a esta ser o mais eficiente possível e esteticamente apelativa.

As secções tubulares tem um ótimo comportamento quando submetidas aos vários tipos de esforços, tais como torção, esforço axial ou flexão, ao mesmo tempo que permitem a criação de soluções estruturais altamente apelativas e belas. Estas características fazem com que as secções tubulares sejam cada vez mais utilizadas por engenheiros e arquitetos nos seus projetos, como ilustrado na seguinte Figura 1.2.

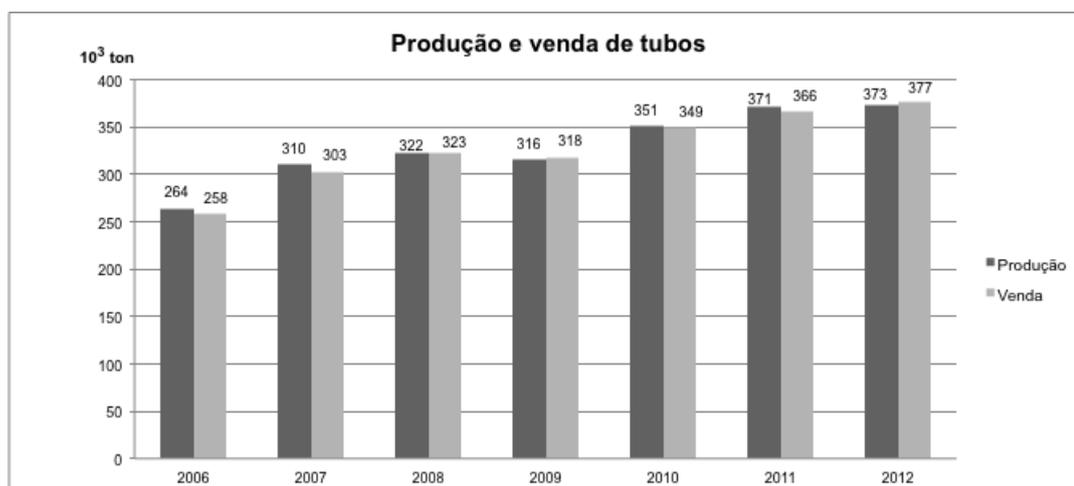


Figura 1.2 - Produção e Venda de Tubos (Freitas, 2013)

O uso de secções tubulares como elementos estruturais traz grandes vantagens às estruturais em que estes se inserem, tais como (Soares, 2012):

- Excelente desempenho em torção, tração e compressão;
- Possibilitam a otimização das estruturas ao nível do peso, da resistência e da rigidez apenas variando a espessura do tubo, não sendo necessário alterar as dimensões externas da secção e geometria da estrutura;
- A sua resistência axial em compressão e resistência contra incêndio pode ser aumentada muito significativamente através do preenchimento interior da secção com betão;
- Sendo estas secções com arestas arredondadas e, no caso de secções circulares ocas, ausência total de esquinas, é muito mais fácil de efetuar uma camada de proteção anti

corrosão, pois a camada de proteção pode ser aplicada de uma forma muito mais uniforme;

- Possibilitam a incorporação de sistemas de ventilação e drenagem no seu interior;
- Apresentam coeficientes aerodinâmicos e hidrodinâmicos muito inferiores quando em comparação com secções abertas;

Apesar das inúmeras vantagens na sua utilização, os perfis tubulares têm as suas desvantagens (Soares, 2012):

- Custo de fabrico mais elevado quando comparado com o custo de fabrico de secções abertas;
- Quando o esforço predominante a que o elemento está sujeito é a flexão existe algum desperdício de material. No entanto, este tipo de secções não apresenta problemas de encurvadura lateral, ao contrário do que acontece com secções abertas;
- Devido à geometria deste tipo de perfis existe uma grande dificuldade na conceção e execução de ligações que aliem a questão estética a um bom comportamento estrutural, sendo este o principal problema e desvantagem associado à utilização de perfis tubulares.

Dentre os vários tipos de perfis tubulares destacam-se os perfis tubulares circulares como sendo a melhor solução tanto estrutural como do ponto de vista estético.

Além das vantagens já anteriormente enunciadas sobre as estruturas tubulares em geral, acrescentam-se algumas que são intrínsecas aos perfis tubulares circulares: Algumas dessas características são as seguintes:

- Este tipo de perfil apresenta um menor perímetro para um maior conteúdo, otimizando a utilização do material e tornando-se mais económico (Firmo, 2005);
- Elevado rácio resistência-peso permite poupar até 40 por cento menos aço.
- Inexistência de um eixo de maior e um eixo de menor inércia, obtendo-se com estes perfis a mesma resistência à flexão qualquer que seja o eixo escolhido, sendo esta a melhor solução estrutural quando é expectável existirem carregamentos que variem a sua direção atuante durante a vida útil do projeto;
- Garantem um menor impacto visual em comparação com os perfis tubulares quadrados e retangulares;
- Não tem arestas, tornando-o o perfil de eleição para a execução de estruturas “*offshore*” e torres eólicas, uma vez que têm um bom comportamento aerodinâmico e hidrodinâmico;

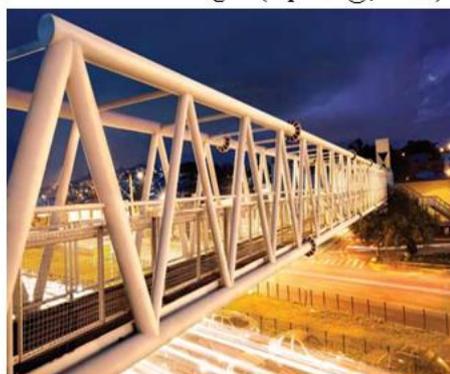
Sendo as vantagens da utilização deste tipo de perfis metálicos claramente superiores às desvantagens, pode-se perceber o porquê do aumento gradual da sua utilização ao longo dos anos, devendo-se este facto, principalmente, a um excepcional comportamento estrutural em termos de flexão, torção e instabilidade, bem como ao elevado rácio resistência-peso dos mesmos. Os perfis tubulares circulares podem ser encontrados nas mais diversas estruturas, tais como estruturas “*offshore*”, torres eólicas, pontes, coberturas de estádios, entre outros. Alguns exemplos da ampla utilização deste tipo de secções pode ser visto na Figura 1.3.



Estádio Do Dragão (fcporto@, 2015)



Estrutura Offshore (vallourec@, 2015)



Passarela (vallourec@, 2015)



Torre Eólica (portal-energia@, 2015)

Figura 1.3 - Estruturas concebidas com Perfis Tubulares Circulares

## 1.2 Objetivos e Procedimento

Como já foi referido anteriormente, quando estamos perante estruturas metálicas constituídas por perfis tubulares, o principal obstáculo da sua execução é a conceção das ligações de emenda entre perfis, uma vez que não é possível aceder aparte interior dos tubos para aparafusar. Deste

modo, as únicas soluções de emenda correntemente utilizadas são ligações aparafusadas com chapa de topo, que são pouco interessantes do ponto de vista estético, e ligações soldadas.

Na Figura 1.4 encontra-se um exemplo de uma ligação de emenda aparafusada tradicional esteticamente pobre. Na Figura 1.5 um exemplo de uma estrutura (Aeroporto de Bruxelas) realizada com ligações de emenda invisíveis e de alto valor estético.



Figura 1.4 - Ligação de Emenda Aparafusada Tradicional (fec.unicamp@, 2015)



Figura 1.5 - Ligação de Emenda Aparafusada Invisível (bontinck@, 2015)

Por seu turno, as ligações soldadas acarretam muitos problemas quando executadas em obra, devido ao seu elevado grau de exigência técnico.

Assim sendo, esta dissertação pretende apresentar uma ligação de emenda aparafusada em treliças constituídas por elementos tubulares, que apresente um bom comportamento estrutural e seja interessante do ponto de vista estético. Algumas das vantagens da ligação em estudo enumeram-se a seguir:

- A ligação em estudo oferece um excelente comportamento estrutural com elevada resistência;
- É impercetível, dando a sensação que não existe uma ligação entre dois elementos, mas antes um elemento contínuo;
- Facilmente se executa em obra por aparafusamento, permitindo baixar o custo de execução da obra;
- Custos de transporte minimizados.

Deste modo, o objetivo desta dissertação passa por estudar uma ligação aparafusada que reúna grande valor estético, seja economicamente viável, de fácil execução em obra e que seja fácil de dimensionar através de métodos correntes em que os parafusos que providenciam a ligação estão apenas submetidos ao corte.

A geometria da ligação foi sendo otimizada ao longo de vários trabalhos anteriores. O processo iterativo resultou numa ligação constituída por perfis tubulares exteriores de espessura igual a 4 mm que estão soldados a perfis tubulares de grande espessura. Estes perfis tubulares de maior espessura servem para se fazer o aparafusamento às chapas interiores de espessura igual a 8 mm, sem que se dê rotura por essa zona durante os ensaios e de forma a permitir avaliar melhor o comportamento da ligação. As chapas interiores constituem o elemento que liga os dois perfis tubulares exteriores, através da utilização de dois tipos de parafusos M16: parafusos do tipo “*Socket Head*” e parafusos do tipo de Cabeça de Embeber. Nas extremidades de cada perfil tubular de 4 mm também existem chapas soldadas de 20 mm de espessura, que formam os elementos que permitem à máquina de testes agarrar a ligação e tracioná-la.

A soldadura existente na ligação foi realizada com penetração total e elevada espessura, de modo a nunca ocorrer rotura por essa componente.

A Figura 1.6 seguinte apresenta uma representação simplificada a três dimensões da ligação acima descrita.



Figura 1.6 - Geometria da Ligação (Silva, 2014)

A ligação em causa consiste em dois perfis tubulares ligados por chapas interiores com furos roscados, que permitem a ligação através de parafusos que ficam inseridos no tubo exterior. Este tipo de parafusos encaixam totalmente nos perfis, introduzindo uma sensação de continuidade na zona de ligação, uma vez que se tornam quase impercetíveis. Além disso, este tipo de solução oferece uma maior área de contato entre a cabeça dos parafusos e os perfis tubulares, melhorando consideravelmente a transferência de forças e reduzindo a área de contato dos mesmos aos elementos ambientais, diminuindo-se também o risco de corrosão.



Figura 1.7 - Pormenor dos Parafusos na Ligação

É importante salientar que esta dissertação pretende ser a última iteração de uma série de investigações prévias, que permitiram chegar a este ponto de conhecimento, enumerando-se as mesmas: “Ligações em Estruturas Trianguladas com Perfis Tubulares de Secção Oca” (Dias, 2011), “Análise de Ligações em Perfis Tubulares com Parafusos de Cabeça Embutida” (Soares, 2011), “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) e “Study of Splice Bolted Connections in Truss Steel Structures with Hollow Sections” (Silva, 2014).

A abordagem a utilizar nesta dissertação passará pela realização de ensaios experimentais de caracterização dos materiais utilizados na ligação e ensaios das ligações à tração.

Assim este trabalho pretende completar a investigação que já foi realizada até agora.

### 1.3 Organização e Conteúdos da Dissertação

Esta dissertação divide-se em 7 capítulos principais mais 2 capítulos que englobam as referências bibliográficas utilizadas e os anexos. A seguir encontra-se uma breve descrição por capítulos:

**Capítulo 1 – Introdução**, neste capítulo encontra-se uma breve introdução e enquadramento ao tema. Também, neste capítulo, é traçado o objetivo da dissertação.

**Capítulo 2 – Estado do Conhecimento**, este capítulo estudos prévios que levaram ao atual estado do conhecimento e regras existentes nos dias de hoje relacionadas com as ligações aparafusadas em estudo. Uma introdução aos vários tipos de elementos existentes na execução dessas ligações também é feita.

**Capítulo 3 – Estudo da Ligação segundo o Eurocódigo 3**, neste capítulo realiza-se o estudo da ligação em causa recorrendo às regras e normas para ligações aparafusadas sujeitas ao corte nos parafusos presentes no Eurocódigo 3.

**Capítulo 4 – Campanha Experimental**, capítulo que descreve e apresenta o procedimento experimental e os resultados obtidos através do mesmo.

**Capítulo 5 – Análise Comparativa com Etapas Anteriores de Desenvolvimento da Ligação**, capítulo onde se faz o tratamento e comparação dos dados obtidos na campanha experimental com os dados já existentes das investigações anteriores.

**Capítulo 6 – Conclusões**, neste capítulo discutem-se os resultados finais e apresentam-se as conclusões tiradas.

**Capítulo 7 – Propostas para Desenvolvimentos Futuros**, possíveis investigações e desenvolvimentos são sugeridos neste capítulo final.

## 2 ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1 Introdução

As ligações aparafusadas utilizadas em perfis tubulares ainda não estão muito desenvolvidas, quando em comparação com o elevado número de estudos existentes acerca de ligações aparafusadas em secções abertas. No entanto, o interesse nas estruturas formadas por perfis tubulares tem vindo a crescer muito nos últimos anos, o que faz prever um aumento muito significativo no desenvolvimento de soluções e regras de dimensionamento que permitam o dimensionamento e execução de ligações aparafusadas nestes tipos de estruturas tubulares.

Esta dissertação insere-se nessa mesma procura de novas soluções inovadoras para ligações aparafusadas entre perfis tubulares, procura essa que é de prever que aumente significativamente o conhecimento acerca da matéria em causa nos próximos anos.

### 2.2 Ligações de Emenda em Perfis Tubulares

#### 2.2.1 Classificação das Ligações

As ligações aparafusadas são classificadas segundo o tipo de esforço que estas transmitem através dos seus ligadores, ou seja, segundo a força a que os parafusos estão sujeitos. Estas ligações podem ser classificadas das seguintes formas:

- Ligações resistentes à tração;
- Ligações resistentes ao corte (concêntrico e excêntrico);
- Ligações resistentes ao corte com tração;
- Ligações pré-esforçadas.

A Figura 2.1 apresentada a seguir mostra esquematicamente os tipos de forças atuantes nos parafusos que formam a ligação.

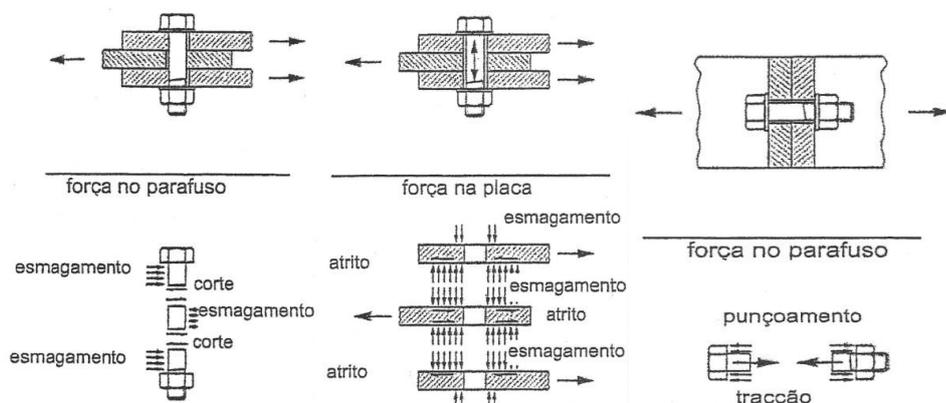


Figura 2.1 - Classificação das Ligações Aparafusadas (Corte, Pré-Esforço, Tração) (Simões da Silva e Santiago, 2003)

O Eurocódigo 3 divide os tipos de ligações aparafusadas por diferentes categorias, tendo em conta o tipo de esforço a que estão sujeitas e os critérios de resistência pretendidos, como exemplificado no Quadro 2.1 seguinte.

Categoria	Critérios
Ligações ao corte	
A resistente ao esmagamento	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$
	$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$
B resistente ao escorregamento no estado limite de utilização	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{v,Rd,ser}$
	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$
	$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$
C resistente ao escorregamento no estado limite último	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$
	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$
	$F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$
Ligações à tração	
D não pré-esforçada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$
	$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$
E pré-esforçada	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$
	$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$

Quadro 2.1 - Classificação de Ligações Aparafusadas (EC3, 2010)

## 2.2.2 Tipos de Parafusos

Atualmente existem muitas formas de parafusos, formas estas que foram desenvolvidas consoante o objetivo para qual a ligação será concebida. A forma mais usual na indústria da

construção metálica é o parafuso com cabeça sextavada, existindo no entanto uma grande variedade de formas, como se comprova na Figura 2.2.

Formas de cabeça	Formatos do corpo	Pontas	Dispositivos de atarraxamento
 sextavada	 com a parede rosçada de diâmetro igual ao da não rosçada	 cônica	 sextavado
 quadrada	 com a parede rosçada de diâmetro maior que o da não rosçada	 arredondada	 quadrado
 redonda		 plana com chanfro	 sextavado interno
 abaulada		 plana	 fenda
 cilíndrica			 fenda cruzada
 escareada			 borboleta
 escareada abaulada			 recartilhado

Figura 2.2 - Tipos De Parafusos (metalica@, 2015)

O Eurocódigo define as diferentes classes de resistência de um parafuso através da forma X.Y, onde X representa um décimo da tensão de rotura à tração de um parafuso em  $N/mm^2$  e o Y a razão entre a tensão de cedência e a tensão de rotura do parafuso. A maior parte das ligações correntes aparafusadas não especificam restrições acerca da classe de resistência do parafuso, no entanto, as ligações pré-esforçadas impõem a utilização de parafusos de alta resistência com classe superior a 8.8, inclusive (Dias, 2011).

Além destes tipos correntes de parafusos, existem também sistemas de aparafusamento especiais desenvolvidos para contornar a dificuldade de criar uma ligação aparafusada entre perfis tubulares, devido à impossibilidade de aceder ao interior dos mesmos na fase de montagem da ligação. Esses sistemas foram desenvolvidos de modo a ultrapassar essa barreira, destacando-se os seguintes (Dias, 2011):

- “Flowdrill System”;
- “Lindapter Hollobolt e HolloFast”;
- Soldadura de Pernos Roscados;
- Porcas Soldadas;
- “Huck Ultra-Twist”;

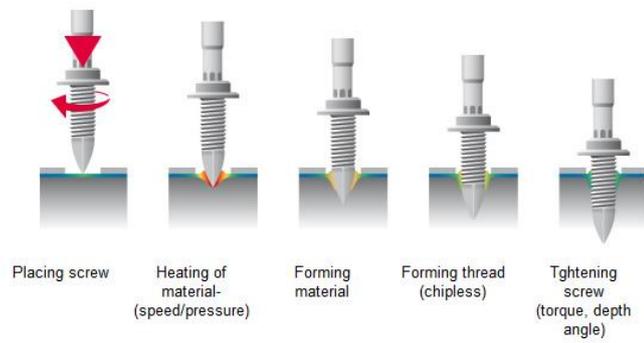


Figura 2.3 - "Flowdrill System" (unique-design@, 2015)



Figura 2.4 - Sistema "HolloBolt" (lindapter@, 2015)

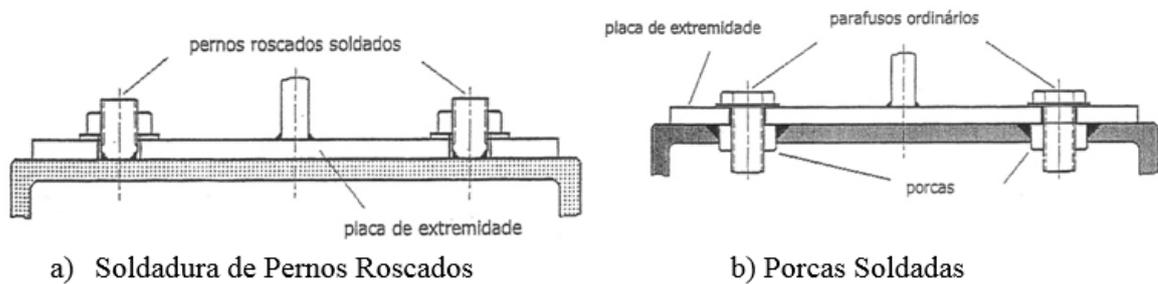


Figura 2.5 - Outros Sistemas (Simões da Silva, Santiago, 2003)

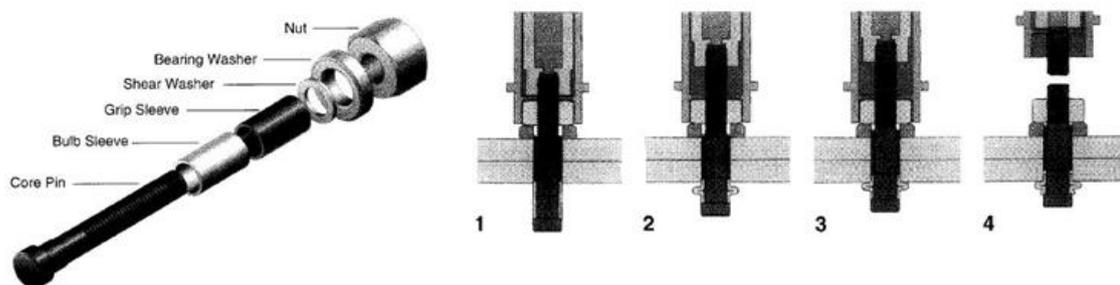


Figura 2.6 - Sistema *Huck-Ultra Twist* (Dutta et al, 1998)

Apesar de existirem estas inúmeras soluções, estes sistemas não são considerados boas soluções estruturais, pois existem sempre incertezas em relação ao comportamento destes, além de serem limitados a diâmetros relativamente baixos (Dias, 2011).

A solução em estudo nesta dissertação tem como objetivo eliminar tais condicionantes, permitindo executar uma ligação com ótimo comportamento estrutural e, ao mesmo tempo, com grande valor estético (parafusos encontram-se inseridos na parede do tubo). Pretende-se assim obter uma solução que seja uma melhor alternativa às atualmente utilizadas em projeto, relativamente a ligações de emenda entre perfis tubulares.

### 2.2.3 Ligação com Placa-Flange

Esta é a solução mais utilizada quando se pretende executar uma ligação aparafusada entre dois perfis tubulares. É uma ligação que facilmente se dimensiona e executa em obra. A ligação consiste em soldar duas placas ortogonais aos dois perfis a unir na extremidade dos mesmos. Essas placas serão posteriormente aparafusadas uma à outra, formando-se assim a ligação entre os dois perfis, como se demonstra na Figura 2.7.

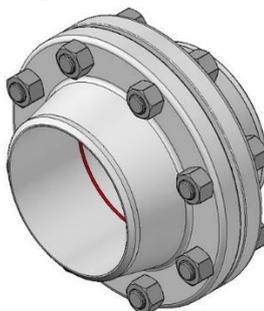


Figura 2.7 - Ligação Típica com Chapas Aparafusadas (wermac@, 2015)

Para se verificar a segurança da ligação terá que se verificar a resistência dos parafusos à tração, a resistência das soldas, a resistência das placas ao punçoamento e a resistência das placas à flexão.

Apesar de esta solução dar boas garantias em termos estruturais, tem o inconveniente de não ser muito interessante em termos estéticos, já que na zona da ligação o tubo perde continuidade.

#### 2.2.4 Ligação Aparafusada com Chapas Laterais

Outro tipo de ligação mais complexo é a ligação com chapas laterais aparafusadas. Neste tipo de ligação os modos de rotura associados são os parafusos ao corte, a resistência das chapas à pressão diametral exercida pelos parafusos e a resistência da soldadura presente na ligação entre chapas e tubos. Esta ligação executa-se soldando em cada tubo abas longitudinais. Essas abas são posteriormente aparafusadas, formando-se assim a ligação pretendida.

Apesar de também este tipo de ligação apresentar bons resultados ao nível estrutural, em termos estéticos deixa ela também muito a desejar.

A Figura 2.8 apresenta um esquema deste tipo de ligação.

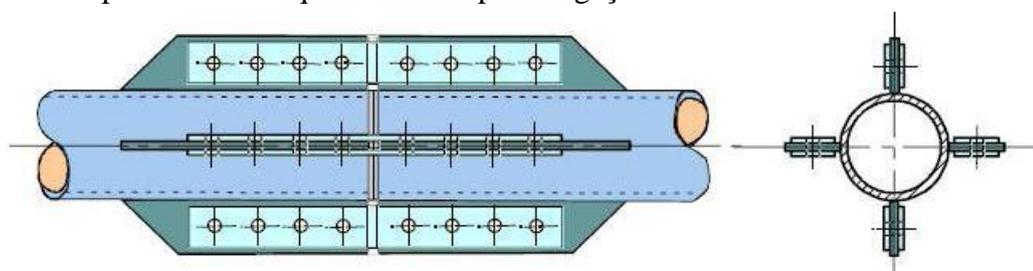


Figura 2.8 - Ligação Aparafusada com Chapas Laterais (Wardenier, 2001)

#### 2.2.5 Ligação Aparafusada com Tubos de Extremidades Achatadas

Esta ligação é uma ligação especialmente apta para estruturas tubulares de pequena dimensão e de carácter temporário, e quando o fabricante não possui os meios necessários para efetuar o corte dos perfis tubulares (Dias, 2011). A resistência deste tipo de ligação depende da resistência dos parafusos ao corte e das extremidades achatadas dos tubos. É uma ligação pouco atrativa em termos estéticos, devido ao achatamento das extremidades dos tubos e ao elevado número de parafusos como se pode observar na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Ligação com Terminais Achatados Aparafusados e Chapa de Gusset (Technica, 2010)

### 2.2.6 Ligação por Pregagem

Segundo Wardenier 1995 e Packer 1996 a pregagem apresenta-se como um método de ligação alternativo à soldadura e aparafusamento, sendo um método bastante fiável e resistente em termos estruturais. Além disso, é bastante fácil e rápido executar este tipo de ligação em obra, não sendo necessário pessoal especializado (Lecce e Packer, 2002).

Os modos de rotura condicionantes neste tipo de ligação são os pregos ao corte e a resistência dos tubos a ligar.

Apesar de ser uma ligação viável, esta não se adequa quando os dois tubos a ligar têm o mesmo diâmetro, o que é o que se verifica na maior parte das situações.

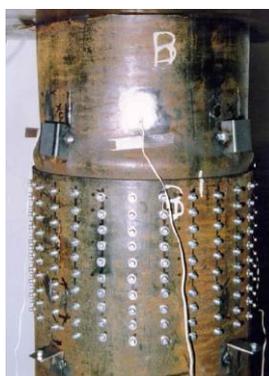


Figura 2.10 - Ligação por Pregagem (Wardenier, 2001)

### 2.2.7 Ligação Aparafusada por Atrito com Parafusos de Alta Resistência

Este sistema de ligação por aparafusamento provém de um projeto de investigação (projeto HISTWIN), que pretende estudar este tipo de ligação inovador para torres eólicas.

Esta ligação é realizada com parafusos pré-esforçados (tipo “*Tension Controlled Bolt*”) sujeitos ao corte, com funcionamento por atrito.

Trata-se de um sistema vantajoso, uma vez que permite uma fácil e rápida montagem e um bom comportamento estrutural. Esta ligação é realizada por módulos de encaixe, como se pode observar na Figura 2.11.

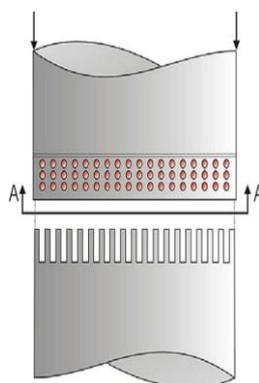


Figura 2.11 - Ligação por Atrito (Dias, 2011)

### 2.2.8 Ligações Estudadas em Fases Anteriores de Desenvolvimento da Ligação em Estudo

Em 2011, Ricardo Dias na sua dissertação “Ligações em Estruturas Trianguladas com Perfis Tubulares de Secção Circular Oca” realizou uma análise numérica recorrendo a elementos finitos calibrada através de resultados obtidos por ensaios experimentais, também realizados pelo mesmo, para caracterizar a ligação em causa. Nas Figuras 2.12 e 2.13 pode-se encontrar o modelo experimental o modelo numérico analisados no âmbito dessa dissertação.



Figura 2.12 - Modelo Experimental (Dias, 2011)

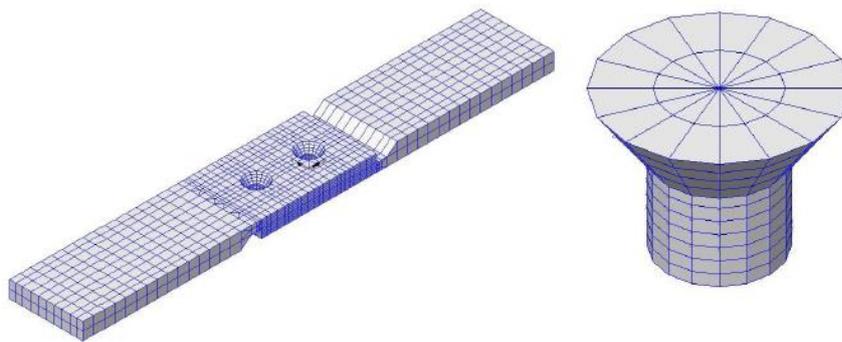


Figura 2.13 - Modelo Numérico (Dias, 2011)

No mesmo ano, Tiago Soares na sua dissertação “Análise de Ligações em Perfis Tubulares com Parafusos de Cabeça Embutida” realizou uma avaliação experimental de uma ligação entre perfis tubulares com parafusos de cabeça embutida. A ligação em causa pode ser visualizada na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Modelo Experimental (Soares, 2011)

Um ano depois, em 2012, António Carvalho realizou uma dissertação designada por “Avaliação Experimental de Configurações Inovadoras Para a Execução de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular”, que pretendia eliminar os problemas encontrados por Soares no âmbito da sua dissertação anteriormente realizada, onde se verificava rotação dos parafusos. Para isso Carvalho concebeu um modelo experimental com peças interiores seccionadas (chapas) e parafusos do tipo “*Hollobolt*” e de Cabeça de Embeber, em vez do tubo interior usado por Soares. A ligação desenvolvida pode ser vista na Figura 2.15.



Figura 2.15 - Modelo Experimental (Carvalho, 2011)

Em 2013, Paulo Freitas desenvolveu uma dissertação intitulada “Configurações Inovadoras de Ligações de Emenda de Barras Metálicas de Secção Tubular”, que pretendia avançar ainda mais o trabalho previamente desenvolvido por anteriores autores anteriormente citados. Para isso, Freitas realizou uma avaliação numérica calibrada com resultados anteriormente obtidos, desenvolvendo o modelo numérico apresentado na Figuras 2.16.

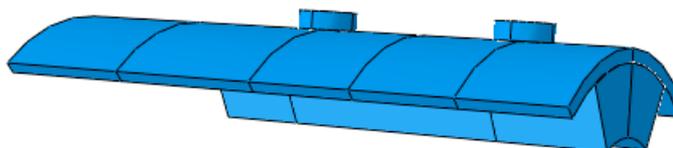


Figura 2.16 – Modelo Numérico (Freitas, 2013)

Em 2014, João Silva realizou uma dissertação intitulada “Study of Splice Bolted Connections in Truss Steel Structures With Hollow Sections”, onde realizou ensaios experimentais com uma nova geometria de ligação e uma análise numérica. Esta foi a fase anterior de desenvolvimento da ligação, em relação à dissertação apresentada neste documento.

Os modelos experimentais e numéricos desenvolvidos por Silva encontram-se nas Figuras 2.17 e 2.18.



Figura 2.17 – Modelo Experimental (Silva, 2014)

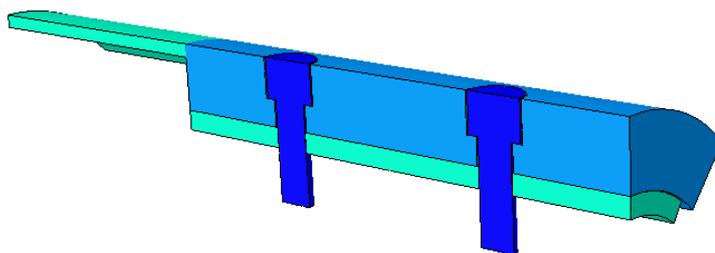


Figura 2.18 – Um dos vários Modelos Numéricos (Silva, 2014)

Também em 2014, foi realizada uma dissertação denominada “Análise Teórico-Experimental de Ligações Tipo Luva Compostas por Perfis Tubulares com Parafusos em linha e Cruzados” pela Universidade Federal de Ouro preto – Escola de Minas da autoria de Lucas Amparo.

Nesse trabalho abordou-se uma tipologia de ligação semelhante à ligação em estudo nesta dissertação, sendo esta composta por dois tubos exteriores ligados por um tubo interior de menor diâmetro por meio de parafusos passantes dispostos em linha e cruzados, como se pode ver na Figura 2.19.

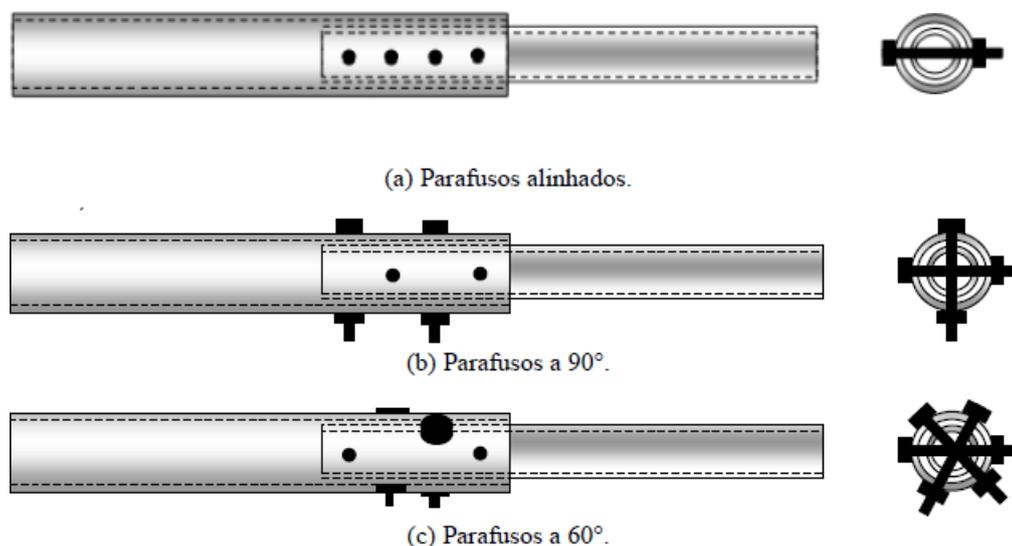


Figura 2.19 – Modelos Experimentais (Amparo, 2014)

### 2.3 Enquadramento Regulamentar

Segundo Packer e Henderson no ano de 1970 surgiu em Inglaterra o primeiro documento de recomendação de projeto para perfis tubulares, derivado de estudos teóricos e experimentais realizados. Um ano depois, esse documento foi implementado no Canadá pela Stelco (US Steel Canada) com a denominação de “Hollow Structural Sections – Design Manual for Connections” (Dias, 2011).

As pesquisas experimentais foram-se desenvolvendo mais durante os anos 80, altura pela qual foram publicados vários artigos e manuais, destacando-se os editados pela associação internacional CIDECT (Comité International pour le Développement et Étude de la Construction Tubulaire) fundada em 1962 (Resende, 2008). Esta associação foca-se principalmente nas estruturas tubulares e as suas pesquisas criaram as bases para muitas das regulamentações utilizadas em diversos países, no que diz respeito ao projeto de estruturas metálicas tubulares.

Com a entrada na década de 90 e o aparecimento de computadores com superiores capacidades de cálculo, os métodos numéricos ganharam maior relevância e muitos estudos foram realizados com recurso a métodos de elementos finitos.

O CISC publicou em 1992 um manual mais completo sobre estruturas tubulares e as suas ligações, com o nome de “Hollow Structural Section: Connection and Trusses – A Design Code” (CISC, 2011).

Mais recentemente, criaram-se normas europeias acerca de estruturas metálicas e suas ligações, sendo estas compiladas no Eurocódigo 3: Projecto de Estruturas de Aço.

## 3 ESTUDO DA LIGAÇÃO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3

### 3.1 Introdução

O cálculo da resistência da ligação em estudo é realizada de acordo com as várias fórmulas presentes no Eurocódigo 3, Partes 1-1 e 1-8. Segundo o Eurocódigo 3, a ligação em estudo insere-se na categoria de ligação ao corte, já que esta é apenas solicitada a esforços de corte. Além disso, dentro dessa categoria, esta ligação pertence à categoria A (ligação resistente ao esmagamento), pois são utilizados parafusos sem pré-esforço.

É importante salientar que os elementos constituintes da ligação não são planos, mas sim curvos, sendo que estes não estão explicitamente presentes nas normas europeias. No entanto, o Eurocódigo 3 não refere qualquer diferença entre elementos planos e curvos em ligações ao corte.

### 3.2 Comportamento Estrutural

Esta ligação demonstra o seguinte comportamento à medida que a carga axial aumenta. Em primeiro lugar dá-se um aumento de carga axial sem que haja aumento de deslocamento, devendo-se este facto ao atrito longitudinal provocado pelo aperto dos parafusos e chapas contra os perfis tubulares. Depois de vencido esse atrito longitudinal, ocorre um ajustamento entre as placas exteriores e interiores e os parafusos, que elimina as folgas existentes entre elementos. Após o ajustamento, os esforços começam a manifestar-se nos elementos da ligação, ocorrendo um aumento gradual das tensões nos diversos componentes da ligação. Com esse aumento de tensões, os elementos começam a deformar (aumentam as extensões), primeiro em fase elástica e depois em fase plástica, até à rotura da ligação.

A rotura da ligação ocorre no elemento de menor resistência ou numa combinação dos mesmos, podendo ocorrer por corte nos parafusos, por rompimento das chapas, por esmagamento das chapas ou por rotura da secção das chapas na zona da  $A_{net}$ , como presente na Figura 3.1.

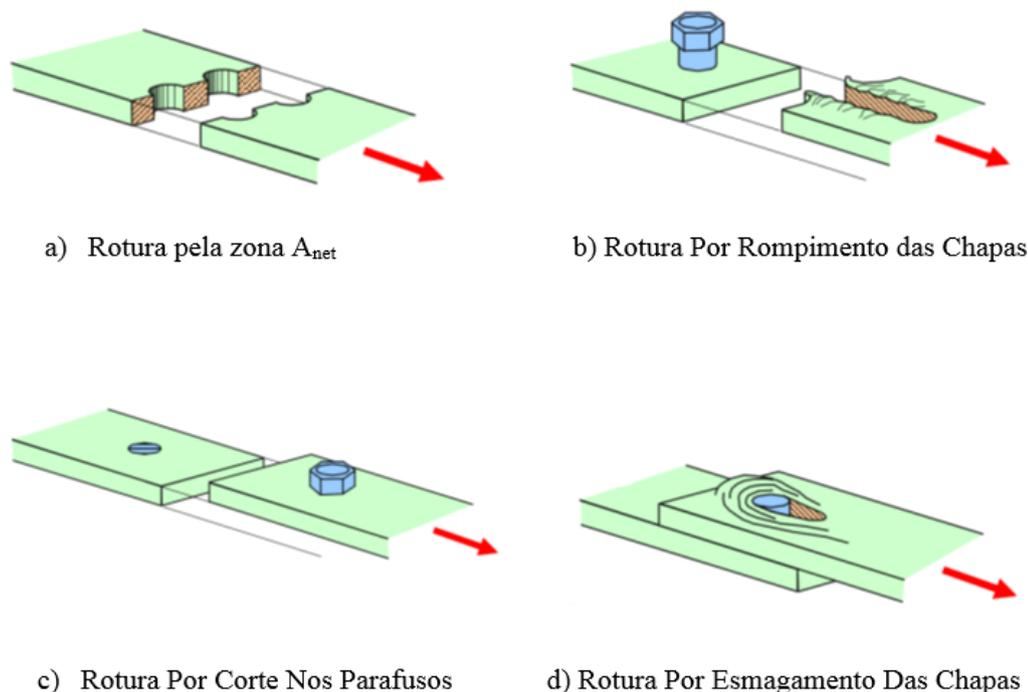


Figura 3.1 - Modos de Rotura em Ligações ao Corte (Silva, 2014)

### 3.3 Formulação da Parte 1-8 para Ligações Convencionais ao Corte

Segundo o Eurocódigo 3, para se verificar a resistência de uma ligação ao corte convencional é necessário verificar a resistência dos seus elementos nas seguintes situações, já citadas anteriormente:

- Parafusos ao Corte;
- Esmagamento das Chapas;
- Rompimento das Chapas;
- Secção em Tração;
- Rotura pela zona  $A_{net}$  (ou Rotura em Bloco);
- Resistência da Soldadura.

É de salientar que a resistência da soldadura não será verificada no decorrer deste documento, pois trata-se de uma soldadura com penetração total e elevada espessura, sendo a sua resistência muito elevada quando comparada com outras componentes da ligação. A rotura em bloco no tubo exterior onde se inserem os parafusos também não será considerada, pois a espessura dessa zona do tubo exterior é muito elevada, não havendo possibilidade de rotura nessa zona.

Uma das verificações que se tem a fazer quando perante uma ligação aparafusada é o espaçamento entre furos e o espaçamento entre furos e as extremidades das chapas, onde se inserem os parafusos. Os limites impostos pelo Eurocódigo encontram-se presentes e definidos no Eurocódigo 3, Parte 1-8 (parte respeitante às ligações) cláusula 3.5, como se pode ver na Figura 3.2 seguinte e respetivas equações 1, 2 e 3.

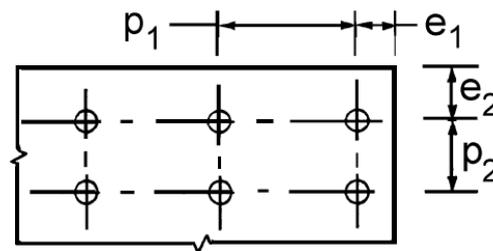


Figura 3.2 - Distâncias entre os Eixos dos Furos de Ligação (EC3, 2010)

$$e_1 = e_2 = 1.2 \times d_0 \quad (1)$$

$$p_1 = 2.2 \times d_0 \quad (2)$$

$$p_2 = 2.2 \times d_0 \quad (3)$$

Em que  $d_0$  é o diâmetro do furo.

A resistência da ligação é-nos dada pela resistência do elemento menos resistente presente na mesma, como dado pelo Eurocódigo 3. As resistências individuais de cada componente da ligação são calculadas tendo em conta as seguintes formulações:

- Resistência dos parafusos ao corte,  $F_{v,Rd}$ :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (4)$$

Em que:

$\alpha_v$  é o fator de redução definido no EC3 1-8, tabela 3.4;

$f_{ub}$  é a tensão de rotura de um parafuso;

$\gamma_{M2}$  é o fator parcial de segurança (igual a 1.25);  
 $A_s$  é a área do parafuso medida na parte roscada do mesmo.

- Resistência das Chapas ao Esmagamento,  $F_{b,Rd}$ :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

Em que:

$k_1$  é o fator de redução definido pelo EC3 1-8, tabela 3.4;  
 $\alpha_b$  é o fator de redução definido pelo EC3 1-8, tabela 3.4;  
 $f_u$  é a tensão de rotura das chapas de aço;  
 $d$  é o diâmetro nominal dos parafusos;  
 $t$  é a espessura da chapa;  
 $\gamma_{M2}$  é o fator parcial de segurança (igual a 1.25);

- Resistência da Secção à Tração,  $N_{pl,Rd}$ :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6)$$

Em que:

$A$  é a área bruta da secção;  
 $f_y$  é a tensão de cedência das chapas;  
 $\gamma_{M0}$  é o fator parcial de segurança (igual a 1.00);

- Resistência à rotura pela zona  $A_{net}$  (Rotura em Bloco):

$$N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

Em que:

$A_{net}$  é a área da secção tracionada;  
 $f_u$  é tensão de rotura das chapas de aço;  
 $\gamma_{M2}$  é o fator parcial de segurança (igual a 1.25);

## 4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

A campanha experimental prevista consiste em três tipos de ensaios: ensaios de caracterização do material das chapas tubulares constituintes das ligações, ensaios de caracterização do material dos diferentes tipos de parafusos utilizados e ensaios de tração das ligações em estudo.

Os ensaios pretendem reproduzir a ligação e estudar o seu comportamento quando submetida a tração pura, usando uma máquina de testes universal. Os objetivos dos ensaios realizados no âmbito desta dissertação são:

1. Caracterizar o comportamento estrutural de um tipo inovador de ligação de emenda,
2. Compreender os parâmetros com mais influência no comportamento estrutural da ligação;
3. Obter valores rigorosos para desenvolvimento e calibração de modelos numéricos;
4. Avaliar a viabilidade/facilidade de montagem/asmblagem em obra.

Como referido anteriormente no decorrer deste documento, este trabalho é a fase final de um processo iterativo de otimização do comportamento da ligação, com os objetivos de:

1. Estudar a rotura fora da zona de ligação, ou seja, na zona do tubo estrutural exterior;
2. Apresentar um esquema viável para implementação em obra.

### 4.2 Ensaio de Caracterização do Material

#### 4.2.1 Aço

##### 4.2.1.1 Introdução

Neste tipo de ensaio experimental pretende-se caracterizar o material constituinte dos perfis tubulares e chapas interiores que constituem a ligação em estudo, de modo a determinarem-se as propriedades mecânicas dos aços utilizados.

Para isso realizaram-se ensaios à tração pura como descrito na norma ISO 6892 para 3 tipos de provetes diferentes, cada um com diferentes espessuras ( $t = 4 \text{ mm}$ ;  $t = 5 \text{ mm}$ ;  $t = 8 \text{ mm}$ ). Realizaram-se 3 provetes por cada tipo, num total de 9 provetes a ensaiar.

#### 4.2.1.2 Geometria e Esquema de Ensaio

As geometrias dos provetes a submeter a ensaios de tração uniaxial foram definidas de acordo com a norma EN 10002-1 de 2006.

As chapas, de onde se obteve o aço para a realização dos provetes, foram obtidas cortando perfis tubulares com espessuras diferentes ( $t = 4 \text{ mm}$ ;  $t = 5 \text{ mm}$ ;  $t = 8 \text{ mm}$ ).

Após o corte das fatias tubulares, definiu-se a geometria dos provetes para cada tipo de espessura, recorrendo-se à norma EN10002 – 2006, de modo a obter-se proporcionalidade nos mesmos. Desta forma é possível fazer uma comparação entre os valores obtidos nos ensaios de tração e os valores nominais regulamentares e valores dos documentos de certificação.

A determinação das dimensões e geometria dos provetes foi então feita de acordo com a Figura 4.1 e equações (8), (9), (10), (11) e (12) seguintes.

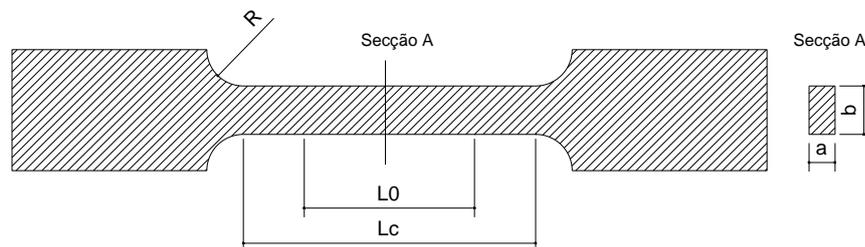


Figura 4.1 - Geometria dos Provetes de Aço

$$L_0 = 5,65\sqrt{ab} \quad (8)$$

$$L_0 > 20\text{mm} \quad L_c = L_0 + 1,5\sqrt{ab} \quad R > 12\text{mm} \quad b < 8a \quad (9) \quad (10) \quad (11) \quad (12)$$

Destas equações obtiveram-se geometrias para 3 provetes para cada 3 diferentes tipos de espessura (total de 9 provetes de diferentes tipos de espessura) como se pode visualizar na Figura 4.2 e Tabela 4.1 seguintes:

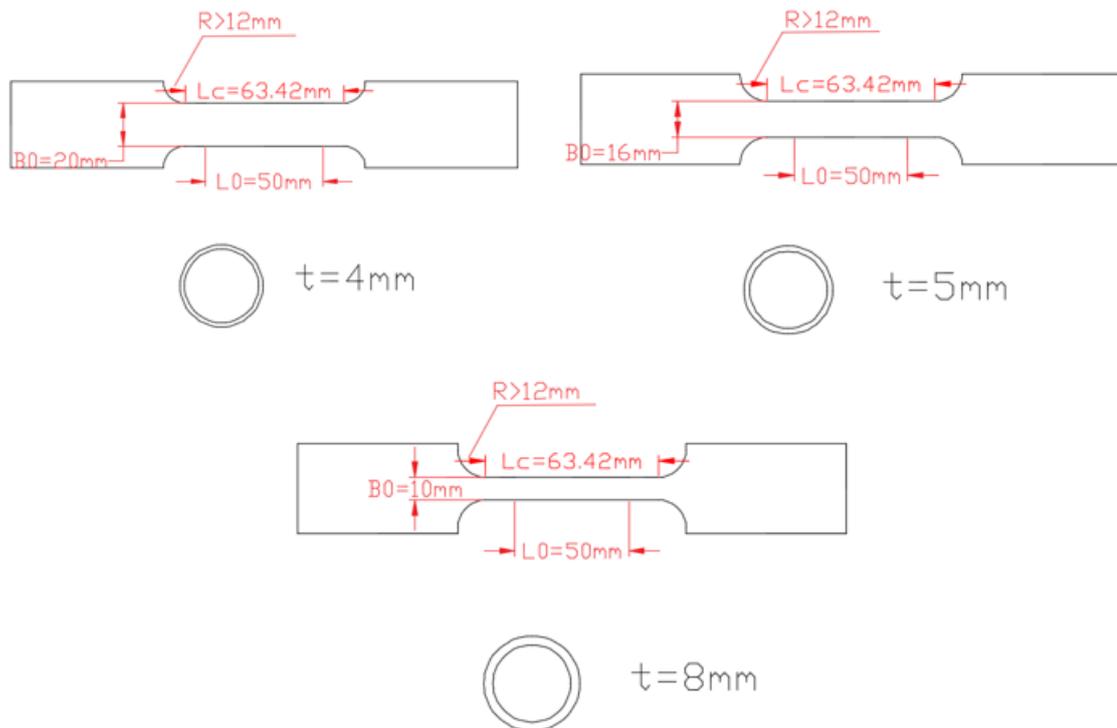


Figura 4.2 - Geometria Provetes para Espessuras 4 mm, 5 mm e 8 mm

	<b>B<sub>0</sub></b>	<b>L<sub>0</sub></b>	<b>L<sub>c</sub></b>	
<b>t = 4 mm</b>	20	50	63.42	mm
<b>t = 5 mm</b>	16	50	63.42	mm
<b>t = 8 mm</b>	10	50	63.42	mm

Tabela 4.1 - Dimensões Provetes Aço

Com as geometrias definidas procedeu-se à execução dos provetes. Para isso fez-se inicialmente um desbaste da maior parte do material a retirar da parte central de cada chapa com uma fresa de 60 mm de diâmetro, pois, sendo o aço muito resistente, existia o risco de a fresa de topo de 6 navalhas de diâmetro 25 mm, utilizada para finalizar o trabalho, se partir, caso desbastasse todo o material. Assim, a fresa de 25 mm de diâmetro só foi utilizada para definir com precisão as geometrias anteriormente estabelecidas.

Na Figura 4.3 seguinte encontra-se o processo de execução dos provetes de aço.



Figura 4.3 – Execução dos Provetes de Aço

Com os provetes definidos, foi necessário proceder à preparação dos mesmos para se poderem instrumentar. Para isso, utilizou-se uma rebarbadora com um disco específico para polir o aço nas zonas onde se pretendia introduzir extensómetros e nas zonas onde existiam imperfeições.

Os resultados desta preparação podem ser visualizados na seguinte Figura 4.4.

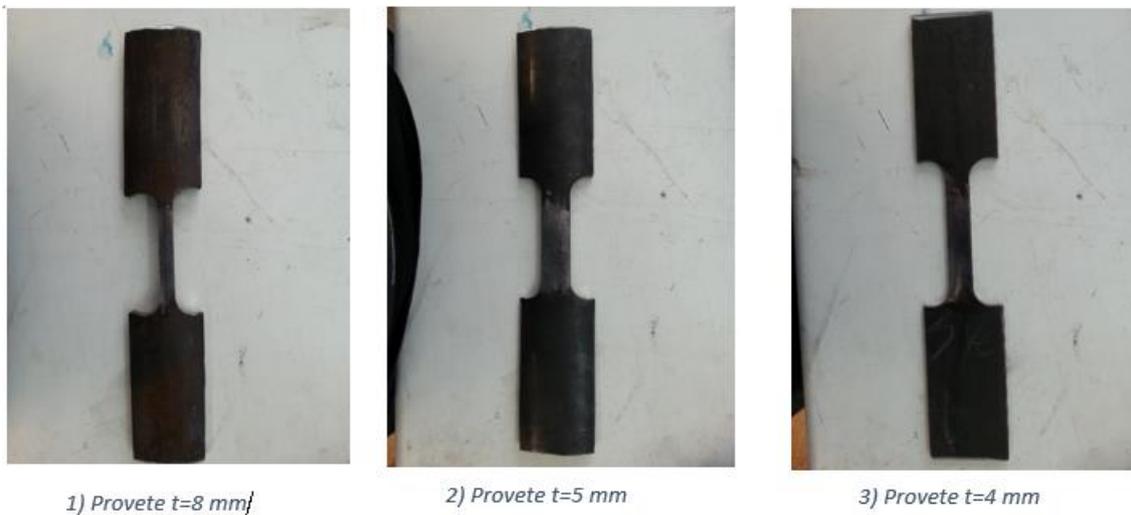


Figura 4.4 - Provetes Tipos por Espessura

#### 4.2.1.3 Instrumentação

A instrumentação dos provetes torna-se necessária, uma vez que a medição do deslocamento apenas pela máquina não é rigorosa, pois há deslizamento nas amarras. Isto é particularmente

significativo em fase elástica, onde as deformações são muito pequenas, sendo a fase inicial do ensaio onde ocorre a maior parte do deslizamento.

Assim sendo, tornou-se necessária a colocação de 1 extensómetro elétrico de alta capacidade do tipo YFLA-5 por provete. Estes extensómetros foram colocados no centro geométrico definido pela linha média entre linhas tangentes às concordâncias e pela linha média da zona central dos provetes, como se pode visualizar nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

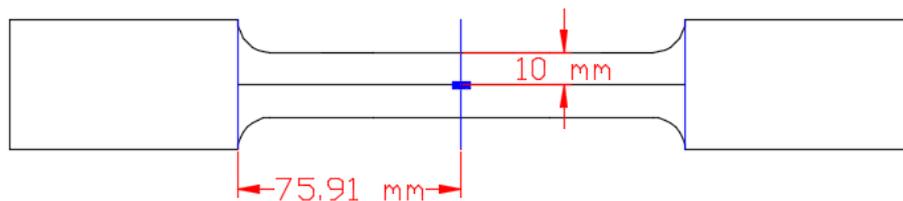


Figura 4.5 - Localização Extensómetro YFLA-5 Provetes Espessura 4 mm

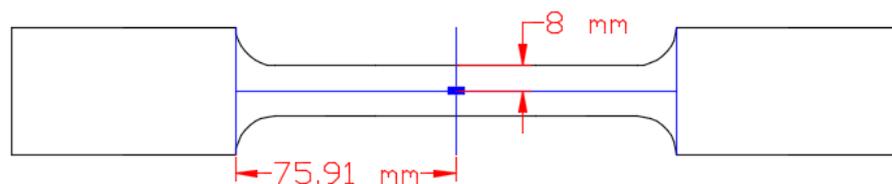


Figura 4.6 - Localização Extensómetro YFLA-5 Provetes Espessura 5 mm

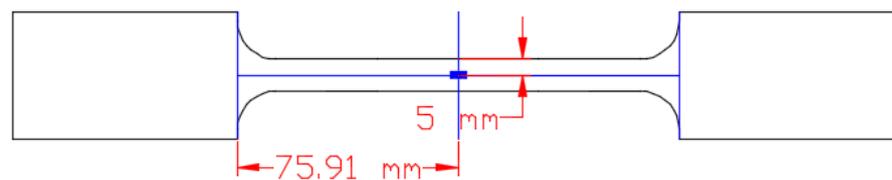


Figura 4.7 - Localização Extensómetro YFLA-5 Provetes Espessura 8 mm

A instrumentação seguiu as seguintes fases sequenciais:

1. Preparação e limpeza da zona onde se insere o extensómetro, polindo-se primeiro com lixa de água e limpando-se depois com acetona a zona em causa;
2. Marcação dos alinhamentos;
3. Limpeza com acetona pura,
4. Colagem do extensómetro;
5. Colocação de pasta protetora;

6. Realização de instalação elétrica através de solda por estanho;
7. Verificação da ligação elétrica;
8. Colocação de camada final de cola protetora.

A Figura 4.8 mostra os provetes já instrumentados.



Figura 4.8 - Provetes instrumentados (esquerda) e Pormenor Instrumentação (direita)

Além dos extensómetros elétricos utilizou-se também um extensómetro mecânico, com capacidade de medição até 12 mm, em cada provete.

O extensómetro mecânico utilizou-se com o mesmo objetivo do extensómetro elétrico, sendo que este era colocado em cada provete momentos antes de se começar os ensaios, como se pode ver na Figura 4.9.

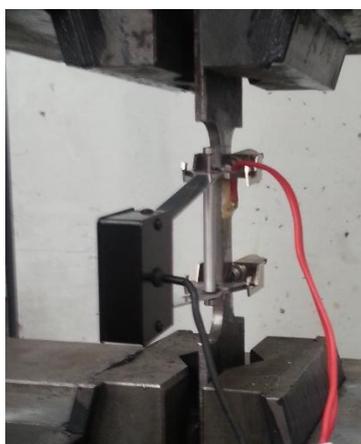


Figura 4.9 - Provete Instrumento Com Extensómetro Mecânico

#### 4.2.1.4 Estratégia de Carga

Para os ensaios de caracterização do aço constituinte das várias componentes da ligação (chapas tubulares e perfis tubulares) utilizou-se uma estratégia de carga segundo as especificações presentes na Norma ISO 6892-1 Método A (Método baseado no controlo de deslocamentos). Assim definiu-se uma velocidade de teste de 0.01 mm/s enquanto o material a ser testado se encontra em fase elástica, alterando-se a velocidade para 0.02 mm/s ao entrar cedência.

Na Figura 4.10 pode-se ver um ensaio a decorrer na máquina de testes universal.



Figura 4.10 - Ensaio de Provete de Aço a decorrer

#### 4.2.1.5 Resultados

Dos ensaios obtiveram-se três tipos de dados:

- Força aplicada pela máquina ao longo do tempo, em kN;
- Deslocamento em mm ao longo do tempo, obtido pela utilização de um extensómetro mecânico;
- Extensão ao longo do tempo no centro geométrico de cada provete, obtido do extensómetro eléctrico.

Destes três tipos de dados facilmente se obtém a tensão ao longo do tempo nos provetes, dividindo a força obtida pela área inicial da secção da zona central de cada provete (espessura  $\times$  largura).

Também se transformou o deslocamento obtido ao longo do tempo pelo extensómetro mecânico em extensão ao longo do tempo, dividindo o deslocamento obtido em cada instante pelo  $l_0$  inicial (igual a 50 mm em todos os provetes).

Após este tratamento de dados traçaram-se as curvas tensão-extensão, tendo-se optado pelas curvas obtidas através dos dados do extensómetro mecânico para caracterizar o aço, visto estas serem praticamente iguais às obtidas pelo extensómetro elétrico, com a vantagem de conseguirem fornecer dados até muito perto da rotura do provete, enquanto o extensómetro elétrico atingia a sua capacidade máxima mais cedo.

As curvas de tensão-extensão obtidas para cada tipo de provete de espessura  $t = 4$  mm podem ser consultadas nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13. É importante mencionar que os três provetes de 4 mm de espessura foram designados por t4-1, t4-2 e t4-3, segunda a ordem de ensaio dos mesmos.

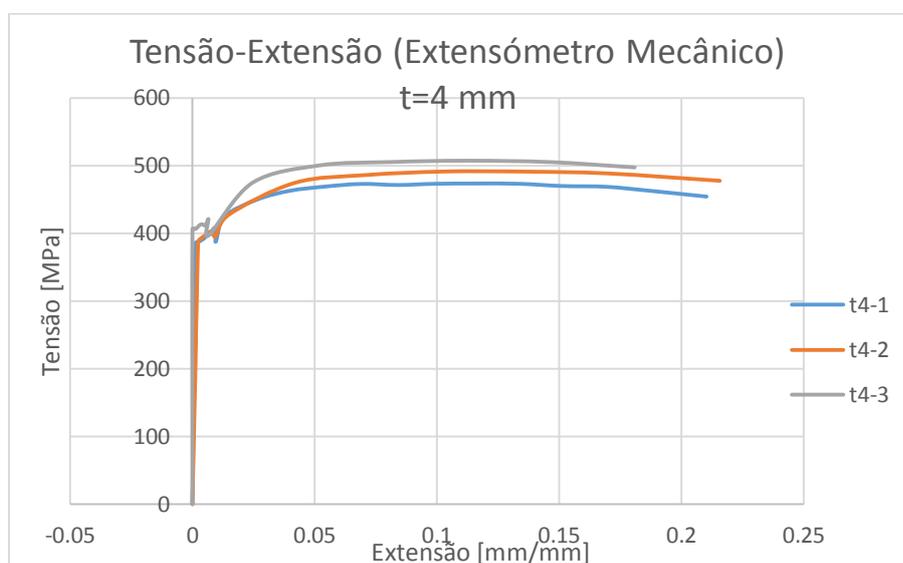


Figura 4.11 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensómetro mecânico para Provetes de espessura  $t = 4$  mm

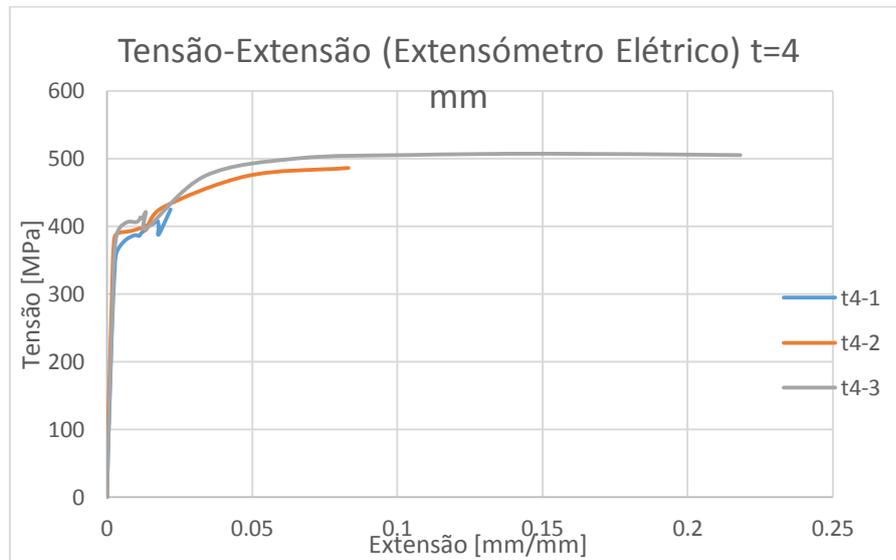


Figura 4.12 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensômetro elétrico para Provetes de espessura  $t = 4$  mm

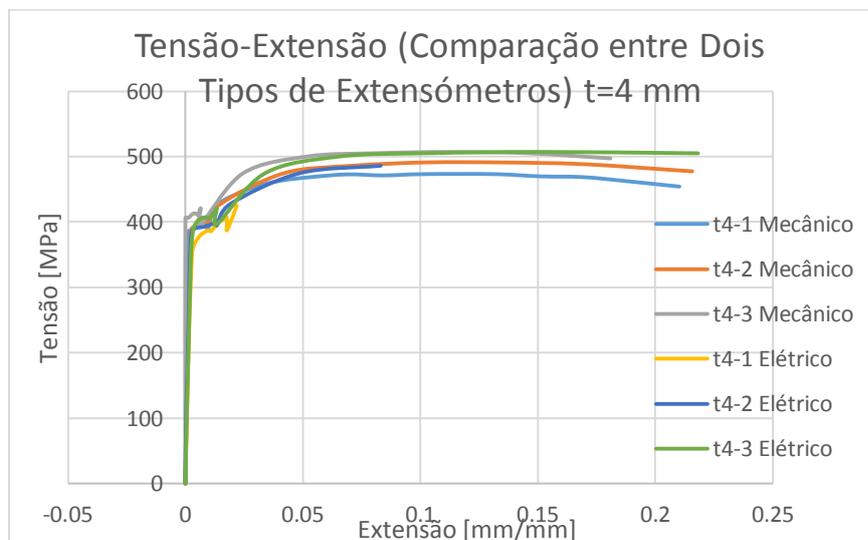


Figura 4.13 - Curvas Tensão-Extensão (Comparação dois tipos de extensômetro)  $t = 4$  mm

Como se pode ver comparando as várias curvas, os resultados obtidos dos extensômetros elétricos estão bastante próximos dos obtidos pelo extensômetro mecânico (à exceção dos resultados obtidos pelo extensômetro elétrico do provete 1, que provavelmente não estava a funcionar corretamente), sendo possível observar que as tensões de cedência, as tensões máximas e as extensões ao longo dos ensaios estão bastantes próximas umas das outras. Isto demonstra que os resultados são consistentes e válidos.

Para os provetes de espessura  $t = 5$  mm traçaram-se as mesmas curvas tensão-extensão e fez-se uma comparação da mesma forma dos anteriores, como se pode ver nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 seguintes. Os provetes foram identificados seguindo a mesma metodologia anteriormente mencionada, sendo estes identificados por t5-1, t5-2 e t5-3.

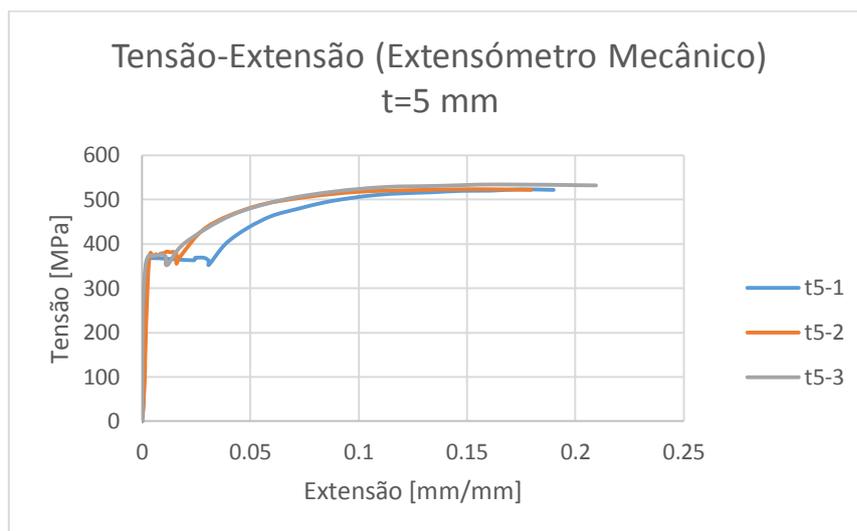


Figura 4.14 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensômetro mecânico para Provetes de espessura  $t = 5$  mm

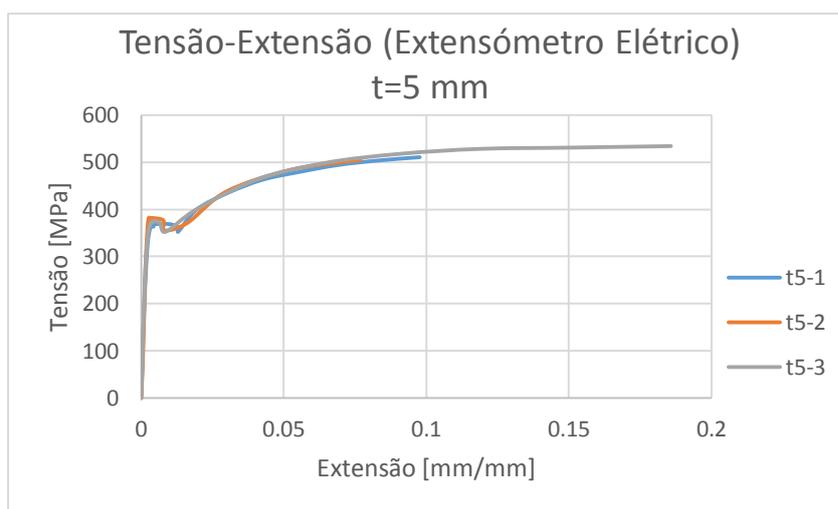


Figura 4.15 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensômetro elétrico para Provetes de espessura  $t = 5$  mm

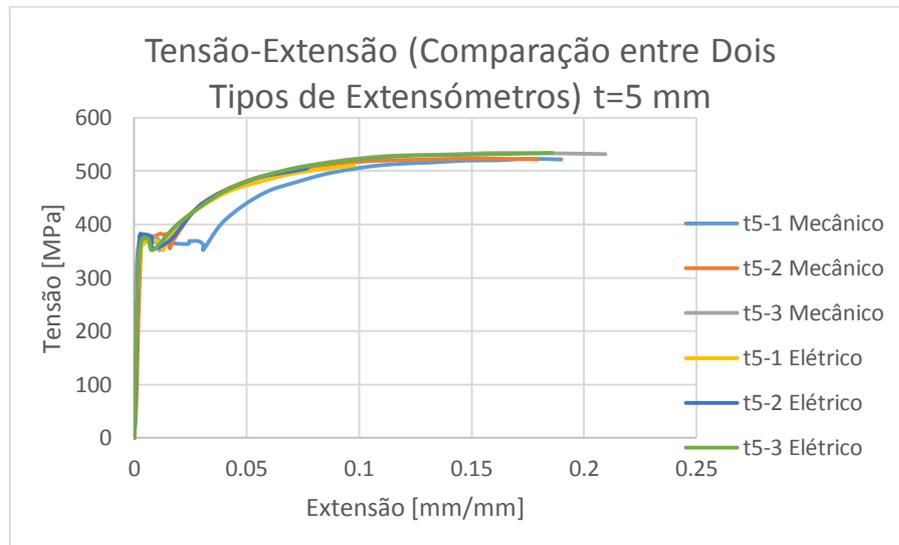


Figura 4.16 - Curvas Tensão-Extensão (Comparação dois tipos de extensómetro) t = 5 mm

À semelhança dos provetes anteriores, as curvas de um e outro tipo de extensómetro apresentam-se bastantes próximas, à exceção da zona do patamar de cedência da curva “t5-1 Mecânico”, sendo os resultados bastante consistentes.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 seguintes apresentam, como nas anteriores, as curvas tensão-extensão dos provetes de 8 mm de espessura. À semelhança dos anteriores, estes foram identificados como t8-1, t8-2 e t8-3.

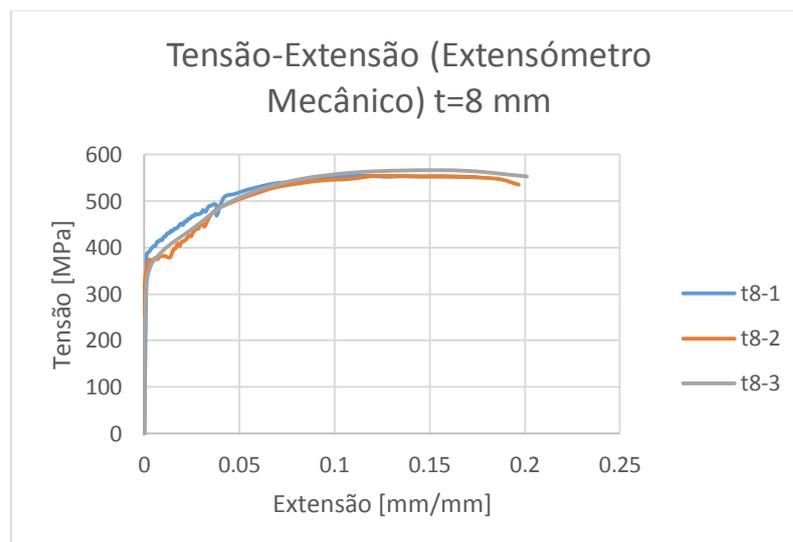


Figura 4.17 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensómetro mecânico para Provetes de espessura t = 8 mm

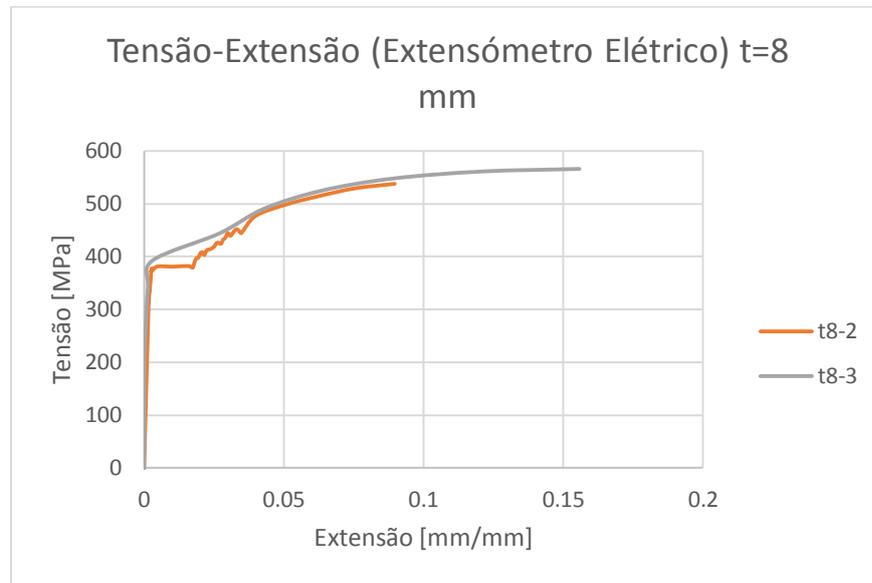


Figura 4.18 - Curvas Tensão-Extensão retiradas através dos dados do extensômetro elétrico para Provetes de espessura  $t = 8$  mm

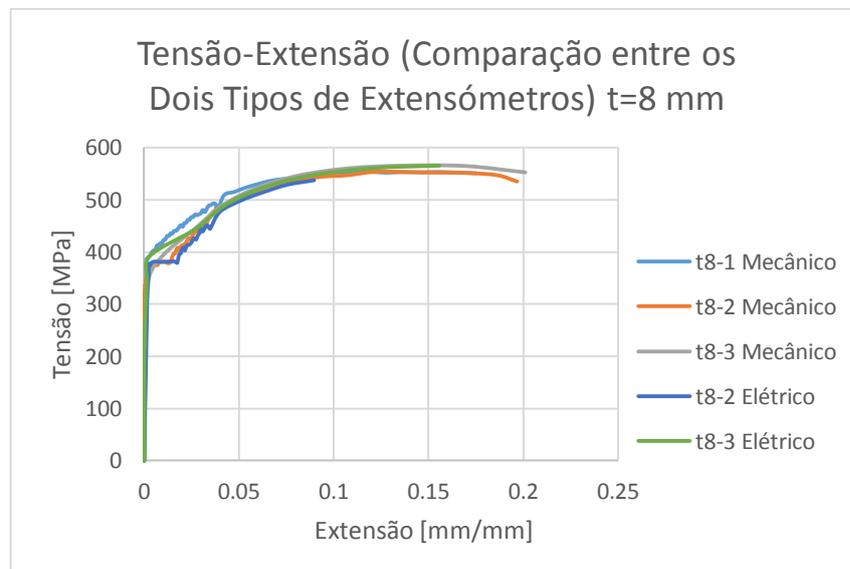


Figura 4.19 - Curvas Tensão-Extensão (Comparação dois tipos de extensômetro)  $t = 8$  mm

Apesar de as curvas apresentarem alguns desvios em algumas zonas quando comparadas, ainda coincidem na maior parte das curvas, demonstrando consistência nos resultados.

As curvas Tensão-Extensão obtidas através dos dados do Extensômetro Elétrico dos provetes t8-2 foram retiradas, pois apresentavam valores não significativos no âmbito desta análise.

Através da análise das curvas tensão-extensão para cada um dos provetes é também possível definir as tensões de cedência e tensões últimas para cada provete de aço. Para isso recorreu-se à Norma ISO 6892-1 ponto 23 para estimar as tensões de cedência em função da curva tensão-extensão, sendo estas tensões correspondentes à tensão  $R_{eH}$ , como se pode ver na Figura 4.20.

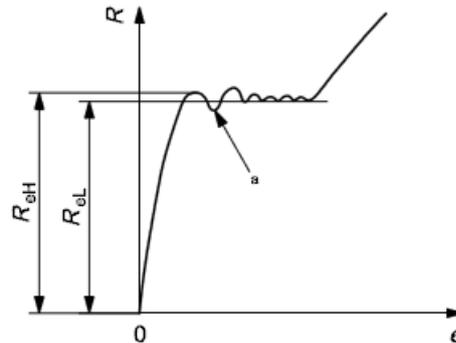


Figura 4.20 - Determinação da Tensão de Cedência em Função da Curva Tensão-Extensão para provetes t4's e t5's (ISO 6892-1, 2009)

Este método foi apenas utilizado para os provetes do tipo t4 e t5, uma vez que as curvas dos provetes t8 apresentam curvas com comportamentos diferentes, recorrendo-se nesse caso a uma diferente metodologia, como se pode ver na Figura 4.21.

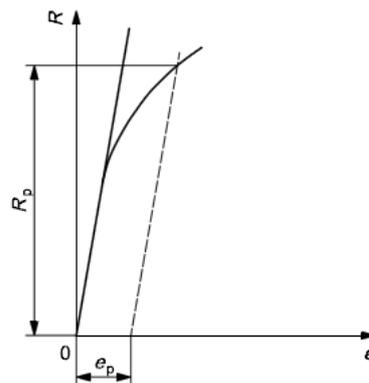


Figura 4.21 - Determinação da Tensão de Cedência em Função da Curva Tensão-Extensão para provetes t8 (ISO 6892-1, 2009)

Fazendo a reta descrita acima com  $e_p = 0.002$ , facilmente se retira o valor de tensão correspondente ( $R_p$ ), que se denomina por tensão convencional de limite de elasticidade e corresponde à tensão de cedência para aços com elevado limite de elasticidade.

As tensões últimas para cada provete de aço correspondem à tensão máxima atingida durante cada ensaio.

Para definir estes dois tipos de tensões para cada tipo de provete de diferentes espessuras, retiraram-se as tensões em cada provete (calculadas em função das dimensões de cada um, medidas antes de cada ensaio) e posteriormente calcularam-se as médias das tensões por tipo de provete. No cálculo destas médias retiraram-se os resultados não representativos.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 a seguir apresentadas apresentam a compilação desses resultados, resultados esses que permitirão mais tarde calcular as resistências das componentes tubulares e chapas na análise da resistência da secção segundo os pressupostos definidos pelo Eurocódigo 3. É de salientar que se denominaram as tensões de cedência por  $f_y$  e as tensões máximas por  $f_u$ , por motivos de simplificação.

	Tensões	
	$f_y$ [Mpa]	$f_u$ [Mpa]
t4-1	387.08	473.45
t4-2	401.82	491.16
t4-3	410.53	507.15
Média	399.81	490.59

Tabela 4.2 - Tensões de Cedência e Última dos Provetes t=4 mm

	Tensões	
	$f_y$ [Mpa]	$f_u$ [Mpa]
t5-1	368.84	522.97
t5-2	379.91	523.33
t5-3	374.10	534.02
Média	374.28	526.77

Tabela 4.3 - Tensões de Cedência e Última dos Provetes t=5 mm

	Tensões	
	fy [Mpa]	fu [Mpa]
t8-1	389.46	554.38
t8-2	371.96	554.18
t8-3	392.44	565.86
Média	384.62	558.14

Tabela 4.4 - Tensões de Cedência e Última dos Provetes t=8 mm

## 4.2.2 Parafusos

### 4.2.2.1 Introdução

Além dos ensaios de caracterização do aço da ligação, também se realizaram ensaios de caracterização dos parafusos utilizados na execução da ligação. Estes ensaios são de grande importância, pois os parafusos são os elementos que fazem a transferência de esforços entre os vários elementos da ligação.

Assim sendo, prepararam-se um total de 12 parafusos para serem ensaiados, 3 por cada tipo de parafuso, existindo 4 tipos de parafuso: M12 do tipo “*Socket Head*”, M12 de cabeça de embeber, M16 do tipo “*Socket Head*” e M16 de cabeça de embeber.

Apesar de na ligação estudada nesta dissertação só se utilizarem parafusos M16, os parafusos M12 foram utilizados em fases anteriores de estudo da ligação. Nesse estudo anterior não se fizeram ensaios de caracterização dos parafusos, pelo que é importante realizá-los, para posteriormente se poder calibrar modelos numéricos.

### 4.2.2.2 Geometria e Esquema de Ensaio

Como já referido anteriormente, os parafusos a ensaiar dividem-se em quatro grupos distintos, cada um deles com geometrias específicas ao seu tipo.

As suas características geométricas iniciais (pré-ensaio) podem ser consultadas nas Figuras 4.22 e 4.23.

Tipo	M12	M16
d (mm)	12	16
b (mm)	30	30
l (mm)	30	30
k (mm)	7	9
dk (mm)	18	24

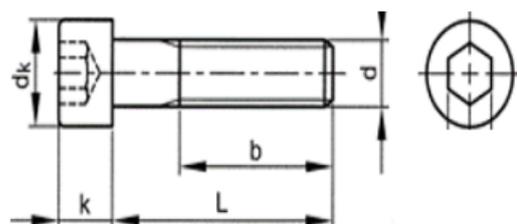


Figura 4.22 - Geometria Parafusos Tipo “Socket Head”

Tipo	M12	M16
d (mm)	12	16
b (mm)	30	30
l (mm)	30	30
k (mm)	7	9
dk (mm)	18	24

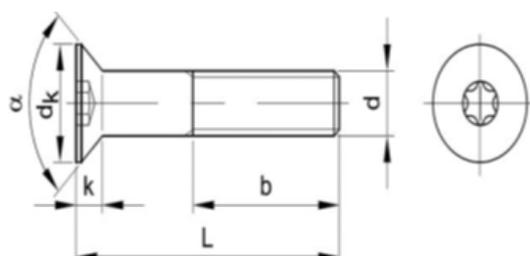


Figura 4.23 - Geometria Parafusos Tipo Cabeça de Embeber

Devido às características geométricas anteriormente indicadas, previram-se desde logo dificuldades para a realização dos ensaios, pois, sendo os parafusos de pequenas dimensões, seria difícil desbastar a parte central da zona roscada, para que se possa colocar um extensómetro eléctrico.

Assim sendo desenvolveu-se uma solução que passa por desbastar a zona central do parafuso a ensaiar, ao mesmo tempo que se deixa suficiente zona roscada para inserir uma peça auxiliar nessa zona que permita a máquina de testes agarrar o parafuso. Na Figura 4.24 pode-se ver a peça utilizada na zona roscada.



Figura 4.24 - Peça Auxiliar de Agarre Zona Roscada

Na zona da cabeça são previstas peças auxiliares que permitem a máquina de testes agarrar o parafuso na zona da cabeça, onde este não tem rosca, como se pode ver na Figura 4.25.



Figura 4.25 - Peças Auxiliares de Agarre Zona da Cabeça do Parafuso

Desbastou-se o máximo possível a zona central da rosca em cada parafuso, para, durante os ensaios, se poder atingir a rotura do mesmo sem ser necessário aplicar grandes forças, que podiam comprometer as peças auxiliares e invalidar os ensaios.

Assim deixou-se um diâmetro na zona central de 8 mm para M16 e 7 mm para M12 e desbastou-se longitudinalmente ao longo da parte rosçada cerca de 15 mm em ambos os tipos com o auxílio de um torno, como se pode ver nas Figuras 4.26 e 4.27 seguintes, onde se podem ver os desenhos de pormenor realizados e fotografias representativas tiradas após torneiar os parafusos em oficina.

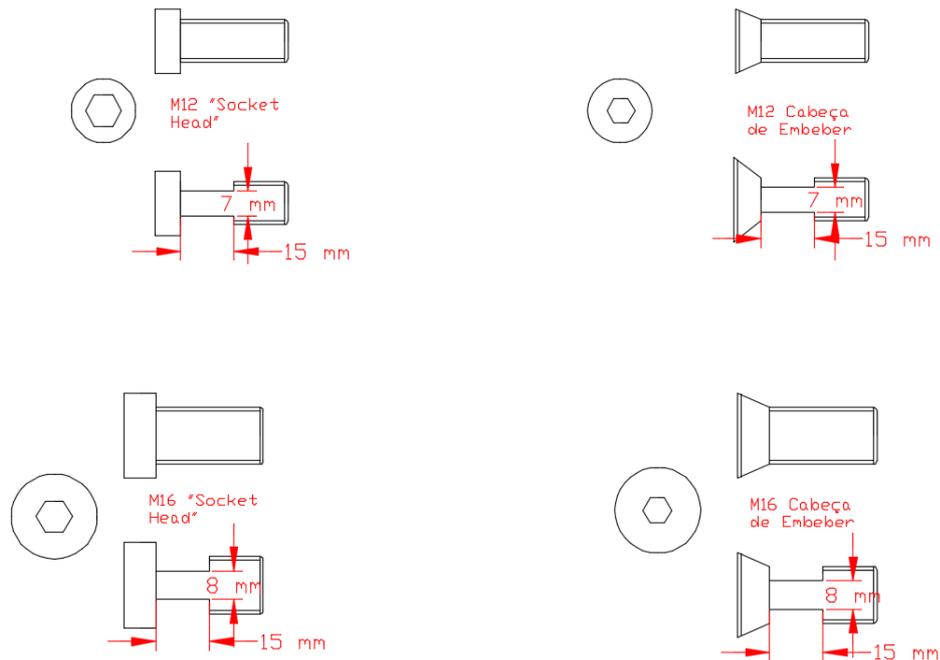


Figura 4.26 - Desenhos de Pormenor dos Parafusos (Antes e Depois de Tornear)



Figura 4.27 - Parafusos Preparados Para Instrumentação

#### 4.2.2.3 Instrumentação

Após os parafusos estarem preparados para a instrumentação procedeu-se à realização da mesma. Para isso optou-se por colocar 1 extensómetro do tipo FLA-3-11 por cada parafuso, sendo estes os únicos extensómetros eléctricos com dimensões que permitissem a sua instalação na zona maquinada.

O processo de aplicação dos extensómetros foi idêntico ao descrito na instrumentação dos provetes de aço.

Na Figura 4.28 encontram-se as posições dos extensómetros.

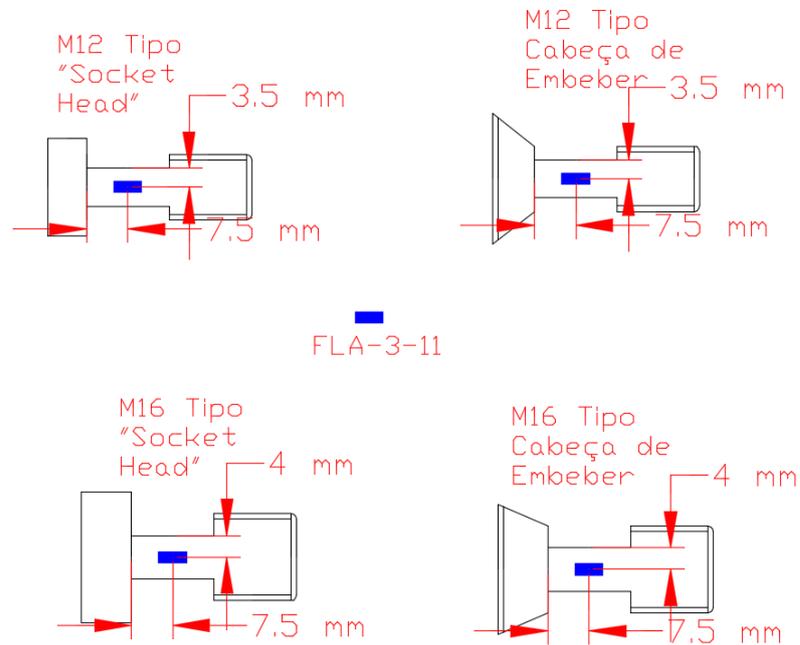


Figura 4.28 - Posição Extensómetros nos Parafusos

A colagem dos extensómetros na zona de diâmetro mais reduzido dos parafusos provou ser particularmente difícil, uma vez que a superfície não é plana e o espaço é muito reduzido.



Figura 4.29 - Exemplo de Parafuso Instrumentado

Um exemplo de um parafuso instrumentado e pronto a ser ensaiado pode ser visto na Figura 4.30.



Figura 4.30 - Parafuso Totalmente Instrumentado

#### 4.2.2.4 Estratégia de Carga

Para os ensaios de caracterização dos parafusos utilizados nas ligações recorreu-se aqui, também, à Norma ISO 6892-1 Método A (Método baseado no controlo de deslocamentos), como nos ensaios de caracterização do aço das componentes da ligação.

As velocidades de teste em controlo de deslocamentos adotadas foram as mesmas dos ensaios anteriores, 0.01 mm/s em fase elástica e 0.02 mm/s em fase de cedência.

#### 4.2.2.5 Resultados

Neste tipo de ensaios de caracterização dos parafusos retiraram-se dois tipos de dados para análise posterior:

- Força aplicada pela máquina ao longo do tempo, em kN;
- Extensão ao longo do tempo no centro geométrico de cada parafuso, obtido através do extensómetro elétrico previamente instalado.

Com estes dados calculou-se a tensão ao longo do tempo na secção maquinada de cada parafuso (força/área) e a extensão ao longo do tempo na mesma secção (multiplicando o valor retirado do extensómetro elétrico por  $10^{-6}$ ). Assim, facilmente se traçam as curvas tensão-extensão para cada parafuso, que permitem caracterizar o comportamento dos mesmos.

Como a capacidade dos extensómetros é reduzida e não permite medir as extensões até à rotura dos parafusos, mediu-se, para cada um, o comprimento inicial da parte maquinada e o

comprimento dos mesmos após rotura, sendo deste modo possível estimar de uma forma aproximada a extensão na rotura.

Os valores obtidos por esta medição foram também incorporados nos gráficos das curvas tensão-extensão, sendo estes valores representados pela reta entre pontos nos gráficos.

Os parafusos foram identificados como SH para os do tipo “*Socket Head*” e CE para os do tipo de Cabeça de Embeber, sendo o SH-M12-1, por exemplo, o parafuso número 1 (em 3) M12 do tipo “*Socket Head*”.

As curvas tensão-extensão para cada tipologia de parafuso ensaiada podem ser consultadas nas Figuras 4.31, 4.32, 4.33 e 4.34.

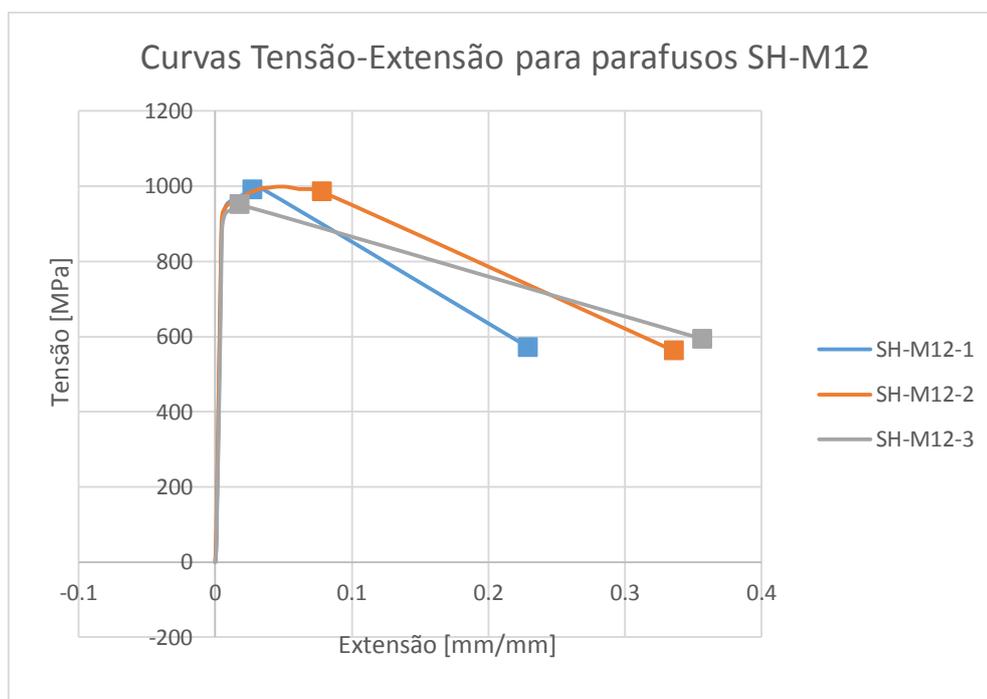


Figura 4.31 - Curvas Tensão-Extensão para Parafusos SH-M12

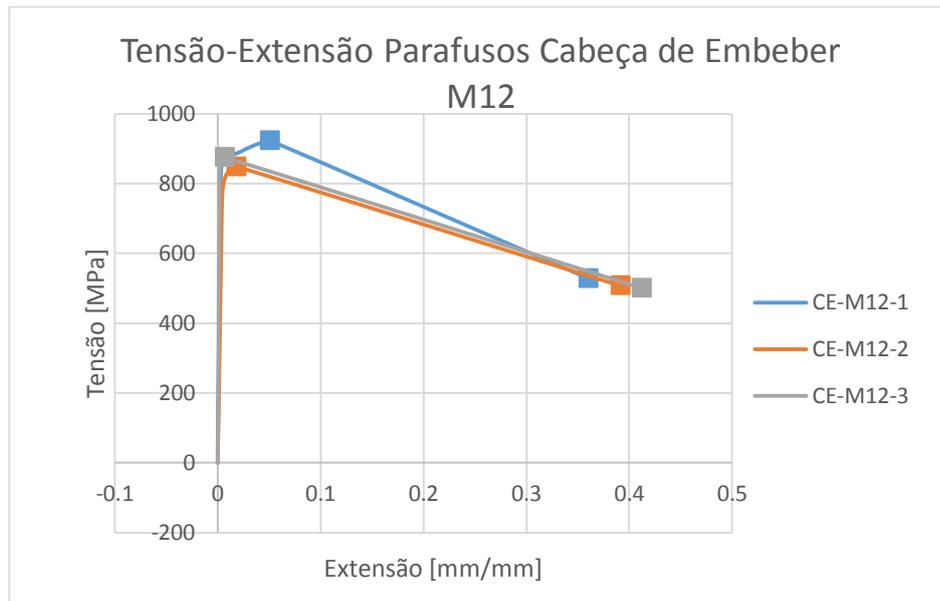


Figura 4.32 - Curvas Tensão-Extensão para Parafusos de Cabeça de Embeber M12

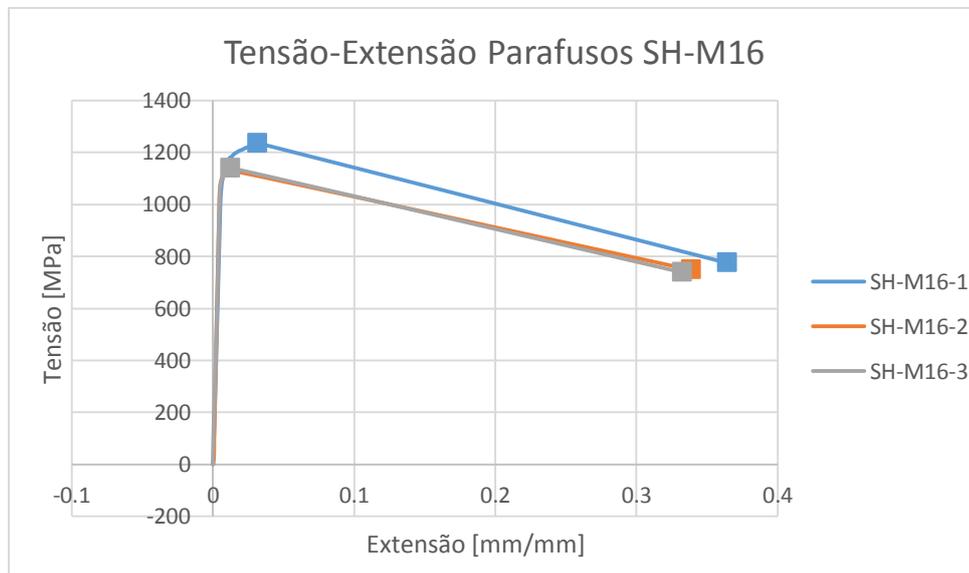


Figura 4.33 - Curvas Tensão-Extensão para Parafusos SH-M16

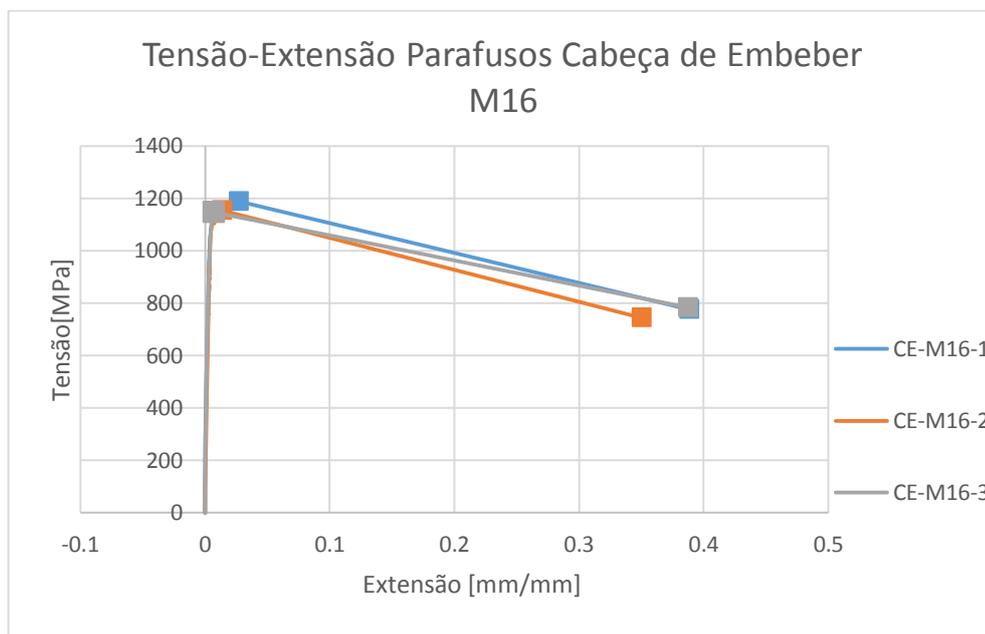


Figura 4.34 - Curvas Tensão-Extensão para Parafusos de Cabeça de Embeber M16

Através da análise das curvas tensão-extensão para cada um dos parafusos é também possível definir as tensões de cedência e tensões últimas para cada parafuso. Para isso recorreu-se à Norma ISO 6892-1 ponto 23 para estimar as tensões de cedência em função da curva tensão-extensão, estando o valor desta tensão localizada no “ponto de viragem” da fase elástica para fase de cedência. As tensões últimas para cada parafuso corresponde à tensão máxima atingida durante cada ensaio.

Para definir estes dois tipos de tensões para cada tipo de parafuso, retiraram-se os valores das tensões em cada parafuso. Depois realizou-se a média das tensões obtidas dos 3 parafusos por cada tipo, sendo estas médias os valores representativos que serão utilizados no cálculo da resistência da ligação em estudo.

Os valores obtidos podem ser consultados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

	Tensão de Cedência - $f_y$ [Mpa]			
	SH-M12	Embeber-M12	SH-M16	Embeber-M16
Nº1	884.58	816.61	1063.91	1057.06
Nº2	911.12	785.23	1022.12	1058.91
Nº3	882.48	836.55	1041.48	1037.05
Média	892.73	812.80	1042.50	1051.01

Tabela 4.5 - Tensão de Cedência dos Parafusos [MPa]

	Tensão Última - fu [Mpa]			
	SH-M12	Embeber-M12	SH-M16	Embeber-M16
Nº1	1005.98	922.66	1236.30	1197.94
Nº2	995.96	889.87	1182.39	1181.78
Nº3	983.63	899.67	1169.60	1202.60
Média	995.19	904.07	1196.10	1194.11

Tabela 4.6 - Tensão Última dos Parafusos [MPa]

Além disso, também se retiraram as extensões na rotura de cada um dos parafusos. Essa informação está compilada na Tabela 4.7.

	Extensão na Rotura [mm/mm]			
	SH-M12	Embeber-M12	SH-M16	Embeber-M16
nº1	0.2295	0.3611	0.3644	0.3889
nº2	0.3364	0.3922	0.3390	0.3506
nº3	0.3572	0.4128	0.3325	0.3879
Média	0.3077	0.3887	0.3453	0.3758

Tabela 4.7 - Extensão na Rotura dos Parafusos [mm/mm]

Analisando as curvas tensão-extensão obtidas, bem como as tensões representativas obtidas (tensões de cedência e tensões últimas), pode-se verificar que as curvas obtidas com os dados dos extensómetros eléctricos são praticamente coincidentes quando se compara os segundos e terceiros ensaios por cada tipo de parafuso, obtendo-se resultados consistentes.

As curvas tensão-extensão obtidas nos primeiros ensaios de cada tipo (SH-M12-1, CE-M12-1, SH-M16-1 e SH-M16-1) revelam alguma discrepância de valores em relação às outras. Isto deve-se, fundamentalmente, ao facto de estes terem sido os primeiros ensaios a serem realizados e, como o método de agarre dos parafusos na máquina de testes é inovador, introduziram-se alguns erros, que foram posteriormente corrigidos nos ensaios seguintes (série 2 e 3 de cada tipo de parafuso).

As retas entre pontos observáveis na fase final de cada curva foram definidas unindo o ponto final obtido pelos dados do extensómetro eléctrico com um ponto obtido pela tensão de rotura

medida e extensão de rotura determinada por medição na rotura do parafuso. Como se pode observar as retas apresentam diferenças entre si, não se obtendo valores representativos através da sua análise.

Analisando as tensões de cedência e tensões últimas por tipo de parafuso, pode-se concluir que os parafusos do tipo SH apresentam tensões características um pouco superiores aos do tipo CE, sendo a diferença maior quando se compara os SH-M12 com os CE-M12.

Quando se faz uma comparação entre as tensões obtidas nos parafusos M12 e M16, verifica-se que as tensões dos M16 são bastante superiores aos M12, como era expectável, pois os M12 são de classe 8.8 e os M16 de classe 10.9.

### **4.3 Ensaaios das Ligações**

#### **4.3.1 Introdução**

Os ensaios experimentais das ligações pretendem reproduzir em laboratório as condições a que este tipo de ligação estará sujeita numa estrutura real. Assim no ensaio a ligação é sujeita tração uniaxial, recorrendo a uma máquina de testes universal.

Nesta dissertação, pretende-se estudar fundamentalmente um modo de rotura: a rotura pelo tubo exterior. Isto deve-se ao facto de outros modos de rotura já terem sido previamente estudados em dissertações anteriores, anteriormente referidas neste documento, como o corte pelos parafusos e a rotura pelas placas anteriores.

Para assegurar a rotura pelo tubo exterior, aumentou-se substancialmente a espessura das chapas interiores em relação à iteração anterior da ligação, que passaram a ter 8 mm de espessura, e o diâmetro dos parafusos, que passaram a ser todos parafusos M16. Como o tubo exterior tem uma espessura de 4 mm, é espectável que a rotura ocorra nessa zona.

Para os ensaios das ligações, consideraram-se 4 provetes, todos eles utilizando parafusos M16. Dois dos provetes utilizam parafusos M16 do tipo “*Socket Head*” e os outros dois utilizam parafusos M16 do tipo Cabeça de Embeber.

#### **4.3.2 Geometria das Ligações**

As ligações já assembladas são constituídas por três elementos: Tubos Exteriores, Parafusos e Chapas Interiores.

Como referido anteriormente, a geometria adotada tem por objetivo fazer com que a rotura se dê pelos perfis tubulares exteriores, como se pode ver nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37 seguintes, que contêm os desenhos realizados para a execução da ligação. É de salientar que se apresenta apenas metade da ligação, devido à outra metade ser simétrica.

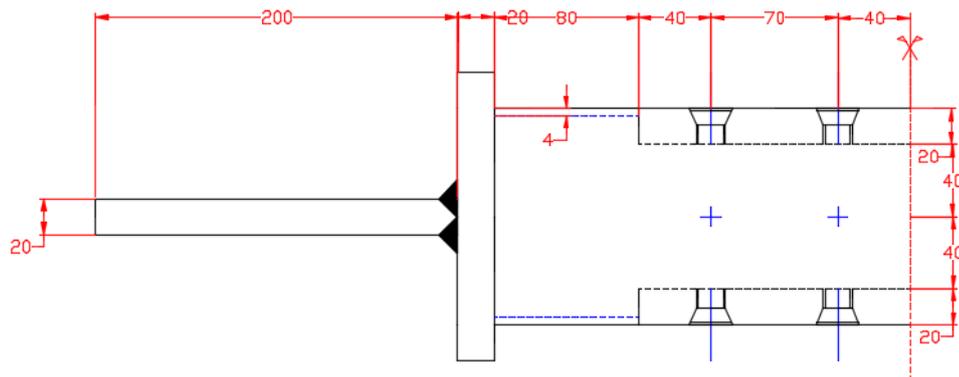


Figura 4.35 - Esquema Ligação Tipo (M16 Tipo Cabeça de Embeber)

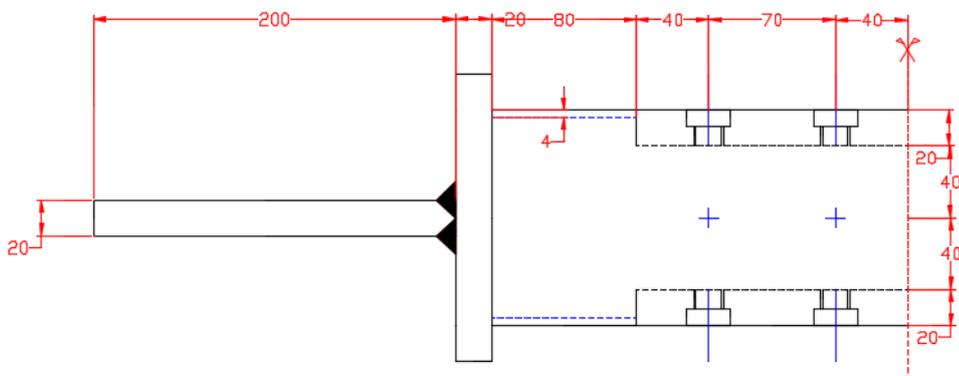


Figura 4.36 - Esquema Ligação Tipo (M16 Tipo "Socket Head")

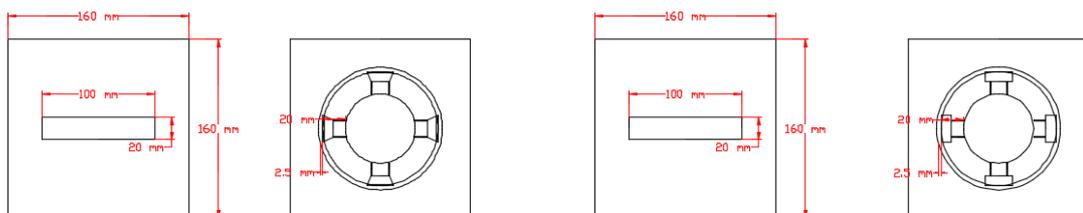


Figura 4.37 - Vistas dos Elementos Exteriores e Interiores para os 2 Tipos de Parafusos

A Tabela 4.8 ilustra a denominação e ordem de ensaios de cada ligação, bem como as suas características geométricas.

	Parâmetros dos Ensaios			
	1	2	3	4
<b>Identificação da Ligação</b>	L-SH-1	L-CE-1	L-CE-2	L-SH-2
<b>Modo de Rotura Expectável</b>	Rotura pelo Tubo Estrutural			
<b>Tipo de Parafuso</b>	SH	CE	CE	SH
<b>Diâmetro do Parafuso</b>	M16			
<b>Classe do Parafuso</b>	10.9			
<b>Espessura das Placas Interiores [mm]</b>	8			
<b>Dimensões Tubo Estrutural [mm]</b>	120x4			
<b>Dimensões Tubo Estrutural Zona Parafusos [mm]</b>	121x20			

Tabela 4.8 - Parâmetros dos Ensaios

#### 4.3.3 Preparação dos Modelos

Antes de se proceder à montagem das ligações a ensaiar foi necessário executar as chapas interiores que fariam a ligação entre perfis tubulares exteriores.

Assim procedeu-se ao corte destas chapas, que foram cortadas de um perfil tubular circular em aço, com paredes de espessura 8 mm. Após o corte de 20 chapas de igual geometria passou-se à execução dos furos nas chapas, onde se inserem depois os parafusos na fase de montagem, como se demonstra na Figura 4.38.

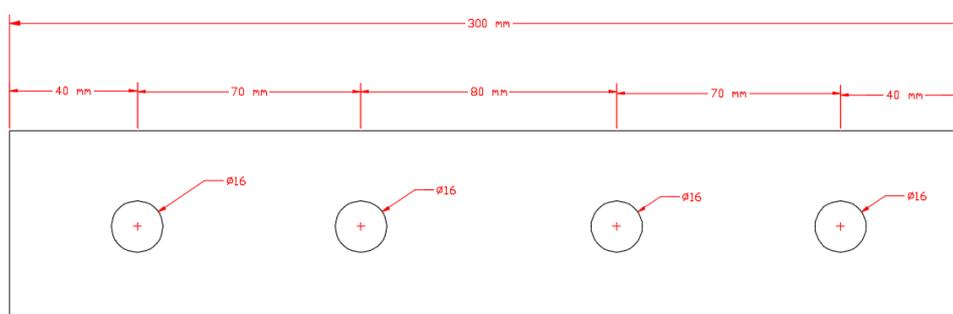


Figura 4.38 - Posição dos Furos nas Chapas Interiores

Os furos foram executados com a utilização de um furador de coluna em oficina. Fez-se um furo inicial de diâmetro reduzido e, depois, um segundo já com o diâmetro necessário em cima do anterior. Isto foi necessário para se evitar o sobreaquecimento e destruição da broca, uma vez que o aço a furar é de elevada resistência. A Figura 4.39 seguinte mostra o processo de furação das chapas.



Figura 4.39 - Processo de Furação das Chapas Interiores

Terminada a furação das chapas interiores, procedeu-se à execução de rosca, que permite o aparafusamento das mesmas. Para tal utilizou-se um desandador para machos e 3 unidades de machos (que realizam 3 passagens por furo). Este trabalho é feito manualmente, rodando-se 1 volta no sentido horário e 2 no sentido anti-horário, repetindo-se este processo até se terminar a rosca ao longo de toda a espessura da chapa. Este processo foi bastante demorado devido ao elevado número de furos a roscar ( $4 \times 20 = 80$  furos) e ao aço ser de elevada resistência, tendo sido executadas no total 240 passagens com o desandador para machos (80 furos x 3 machos).

A Figura 4.40 ilustra o procedimento de execução de rosca nos furos das chapas interiores.



Figura 4.40 - Execução de Rosca

Estando as roscas todas feitas podia-se então partir para a fase de montagem das ligações a ensaiar.

A montagem das ligações foi então realizada, tendo-se começado por apertar ligeiramente os parafusos de uma metade da ligação e só depois introduzir a outra metade. Caso não se seguisse esse procedimento não seria possível apertar os parafusos da outra metade da ligação, pois os furos não ficariam no seu devido lugar. A seguinte Figura 4.41 apresenta as fases de montagem dos provetes das ligações.



a) Provette a meia montagem

b) Provetes no fim da montagem

Figura 4.41 - Montagem dos Provetes das Ligações

#### 4.3.4 Instrumentação

Após a montagem dos provetes das ligações procedeu-se à instrumentação dos mesmos. Para isso utilizaram-se extensómetros de alta capacidade do tipo YFLA-5, tendo-se utilizado 2 por provete, num total 8 extensómetros.

Estes foram colocados no centro geométrico dos tubos exteriores, onde se prevê a rotura do provete. Estes extensómetros colocaram-se a 90 graus um do outro em cada provete, como se pode ver nas Figuras 4.42 e 4.43.

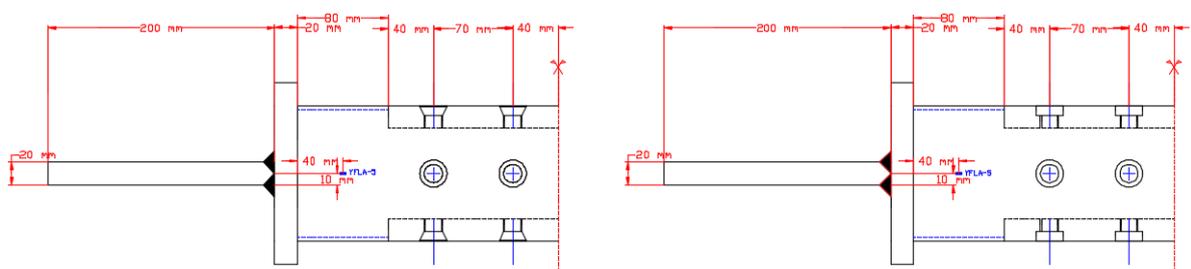


Figura 4.42 - Posição Extensómetros Posição do Provette a 0 graus

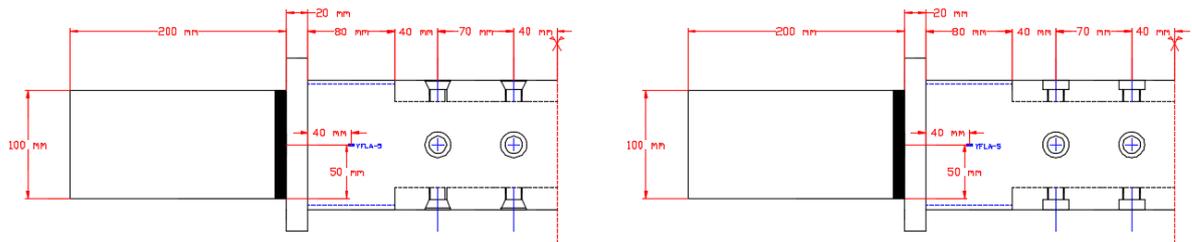


Figura 4.43 - Posição Extensómetros Posição do Provete a 90 graus

A instrumentação dos provetes com extensómetros elétricos foi realizada seguindo a mesma metodologia utilizada nos anteriores ensaios, podendo-se visualizar o resultado final na Figura 4.44.

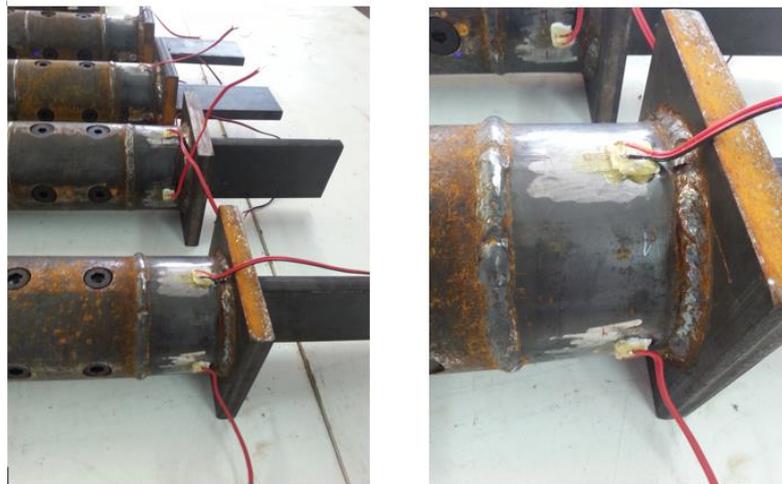


Figura 4.44 - Instrumentação dos Provetes das Ligações

Além dos dois extensómetros elétricos por ligação foram também colocados dois defletómetros com 25 mm de capacidade de medição por cada uma das ligações. Estes servem para medir os deslocamentos ao longo do tempo na ligação.

Em relação à sua posição, um deles foi colocado do lado esquerdo da ligação enquanto o outro foi colocado do lado direito da mesma ligação, como se pode ver nas caixas a vermelho, presentes na Figura 4.45.

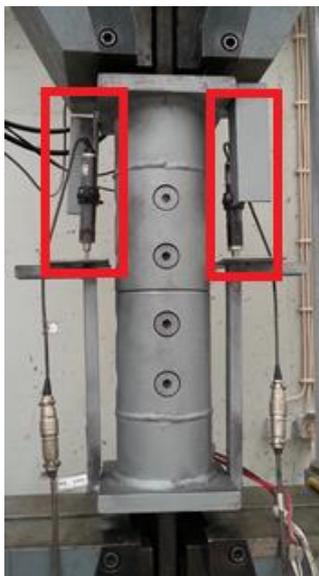


Figura 4.45 - Posição dos Defletómetros

#### 4.3.5 Ensaio

As velocidades adotadas foram 0.01 mm/s em fase elástica e 0.02 mm/s logo que alguma componente da ligação a ensaiar começasse a ceder.

Durante os ensaios das ligações passaram-se por várias fases diferenciadas por diferentes comportamentos das ligações, como exemplificado na Figura 4.46.

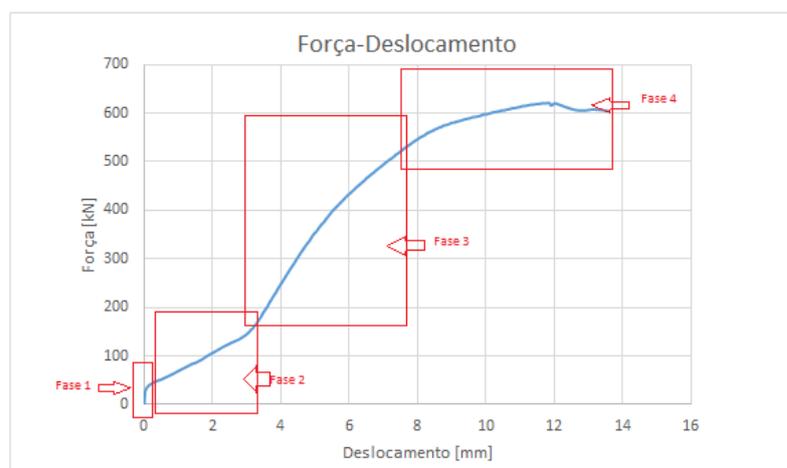


Figura 4.46 - Fases Distintas durante Ensaio das Ligações

Na Fase 1 indicada na figura verifica-se um aumento da força aplicada sem aumento de deformação. Isto deve-se ao atrito longitudinal entre as chapas interiores e o tubo exterior e ao atrito longitudinal entre a cabeça dos parafusos e o tubo exterior, provocado pelo aperto dos parafusos. Logo que se mobiliza a força necessária para vencer esse atrito entra-se na Fase 2.

Na Fase 2 verifica-se um aumento dos deslocamentos sem grande aumento de força. Nesta fase ocorre um escorregamento inicial dos elementos da ligação (chapas, perfis tubulares e parafusos) até que sejam vencidas as folgas entre eles.

Estando vencidas as folgas, entra-se na Fase 3, que corresponde ao aumento da rigidez da ligação devido ao encosto das componentes umas às outras. Assim entra-se em regime elástico, com aumento dos deslocamentos em função do aumento da força aplicada.

Quando algum elemento da ligação começa a entrar em cedência, entra-se na Fase 4, com aumento dos deslocamentos com pouco aumento de carga. A partir de certo momento, também se pode visualizar um ligeiro aumento da rigidez, que corresponde ao endurecimento do aço. Com o aumento gradual dos deslocamentos ocorre perda de rigidez da ligação, devido aos elementos em cedência, verificando-se uma da força aplicada com aumento dos deslocamentos, fenómeno que continua até à rotura da ligação.

A rotura da ligação começa por ocorrer nas componentes mais fracas da ligação. Após a rotura da componente mais fraca, as tensões continuam a aumentar nas outras componentes mais resistentes, até que estas entrem também em cedência e posterior rotura, atingindo-se assim a rotura da ligação.

#### **4.3.6 Resultados**

Os provetes das ligações foram ensaiados utilizando a máquina de ensaios universal utilizada nos ensaios de caracterização anteriores.

As ligações nestes ensaios estiveram portanto sujeitas a tração uniaxial.

Na Figura 4.47 pode-se visualizar a disposição das ligações na máquina de testes, pré e pós-ensaio.

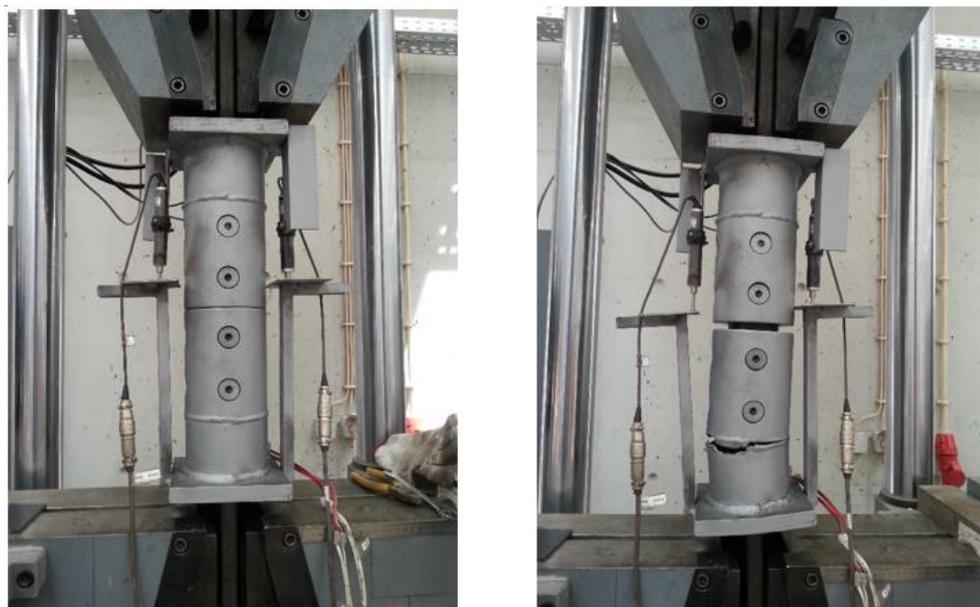


Figura 4.47 - Exemplo de ligação em Pré e Pós-Ensaio

Os dados obtidos através da máquina de testes, extensómetros eléctricos e defletómetros permitiram traçar curvas força-deslocamento e força-extensão.

É de salientar que, como as curvas definidas pelos dois defletómetros por ligação são praticamente coincidentes, como se pode observar nas Figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51, que mostram as curvas força-deslocamento obtidas através dos dados retirados pelo defletómetro da esquerda e da direita de cada ligação.

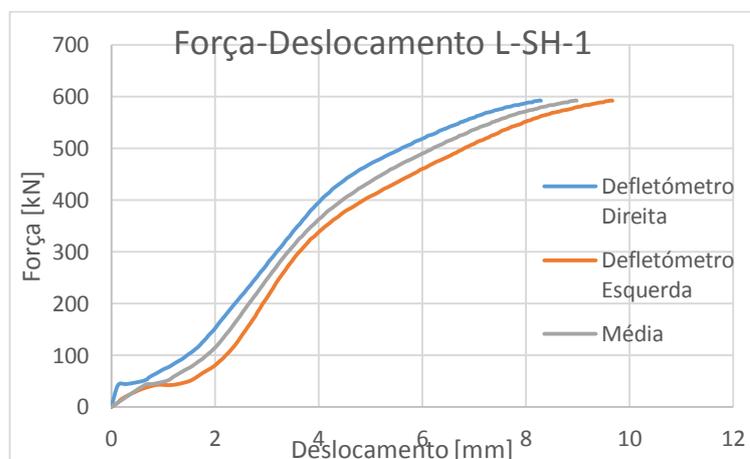


Figura 4.48 - Força-Deslocamento Ligação SH-1

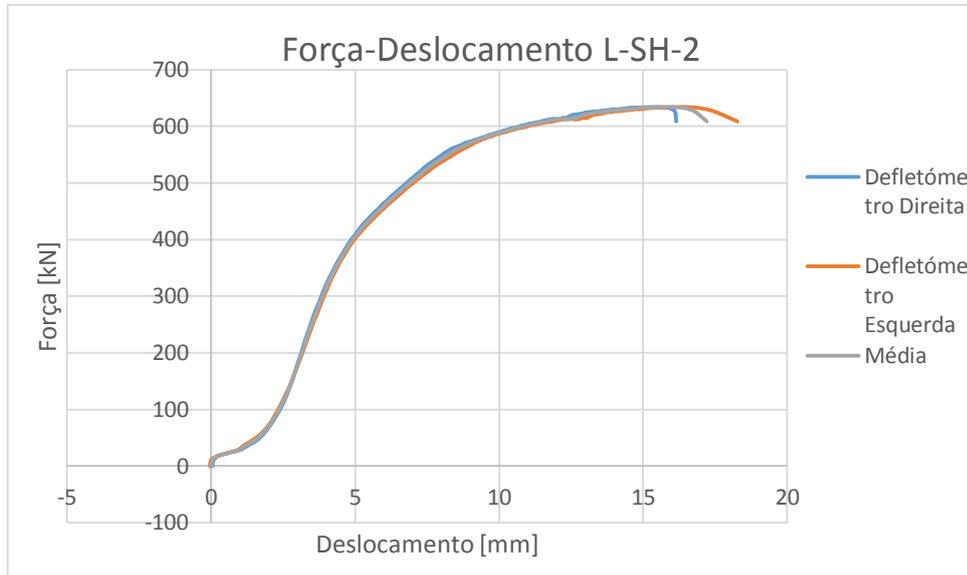


Figura 4.49 - Força-Deslocamento Ligação SH-2

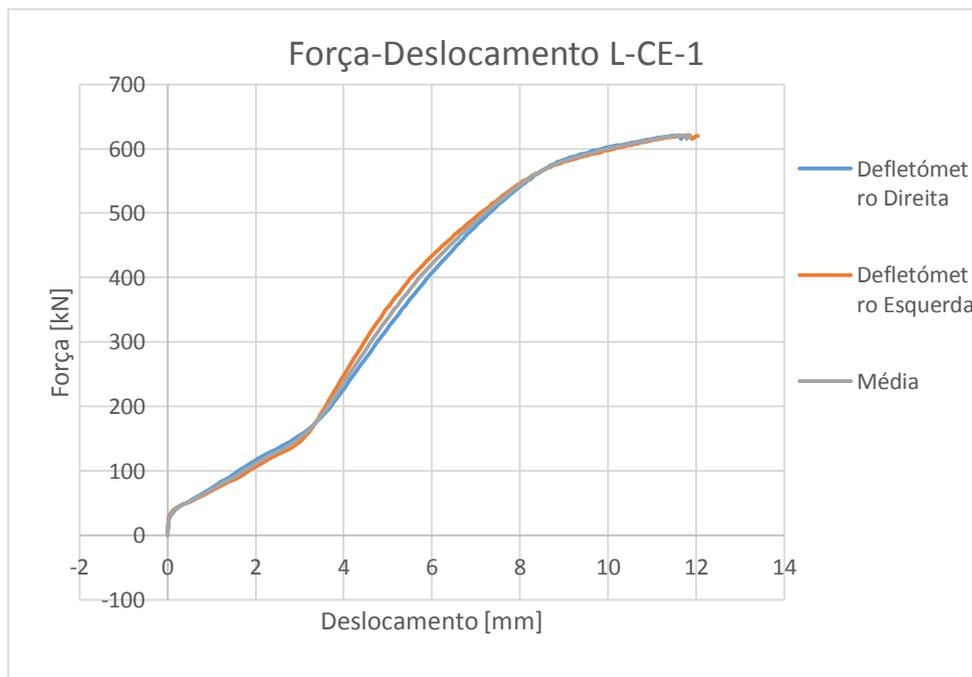


Figura 4.50 - Força-Deslocamento Ligação CE-1

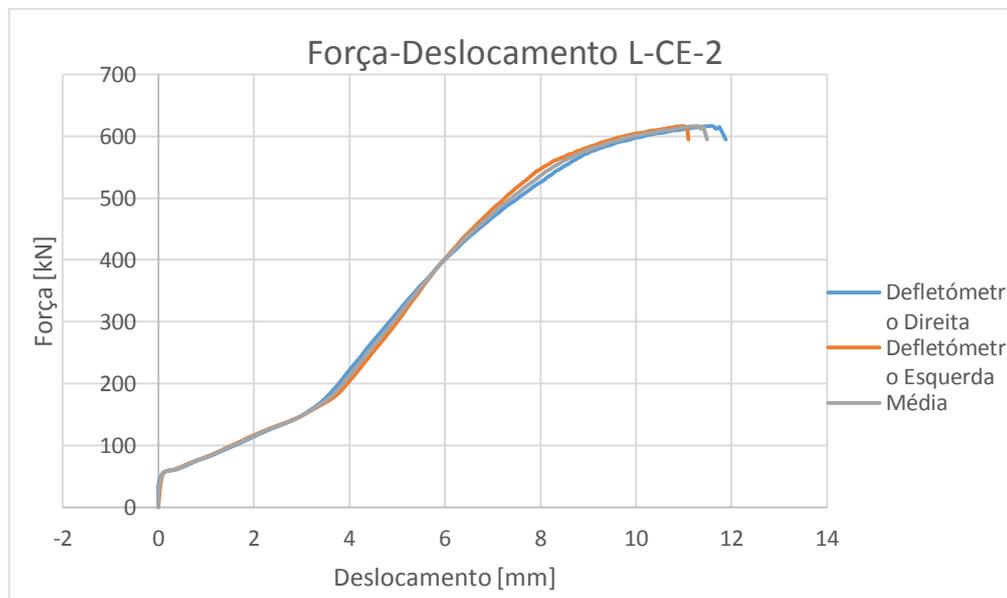


Figura 4.51 - Força-Deslocamento Ligação CE-2

Analisando e comparando as várias curvas obtidas, percebe-se imediatamente que as curvas obtidas com os dados dos defletómetros posicionados à esquerda são praticamente coincidentes com as curvas obtidas com os dados dos defletómetros posicionados à direita, o que demonstra que não existe deformação fora do plano durante os ensaios. Obviamente, se as curvas fossem traçadas até ao momento da rotura total da ligação (quando a força atingisse de novo os 0 kN) as curvas nesse ponto já estariam muito distantes uma da outra, pois a rotura dificilmente ocorre uniformemente, existindo maiores deslocamentos de um lado ou do outro.

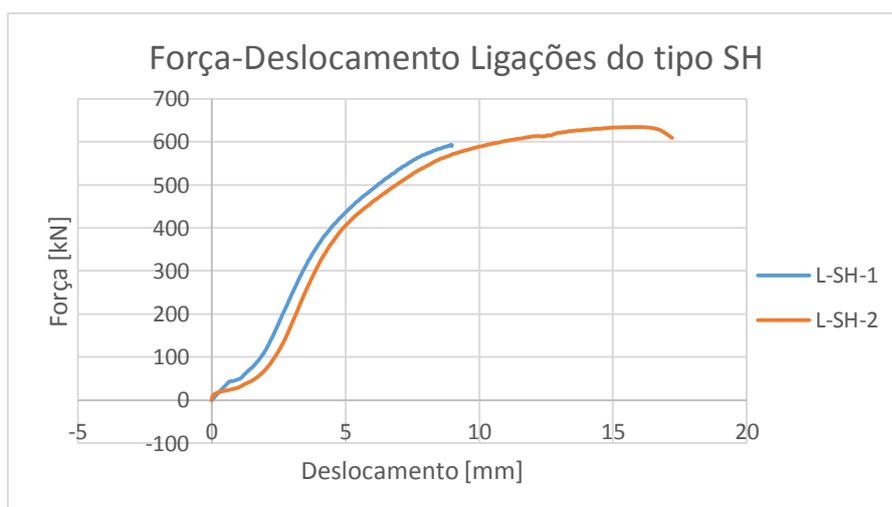


Figura 4.52 - Força-Deslocamento (Média) Ligações do tipo SH

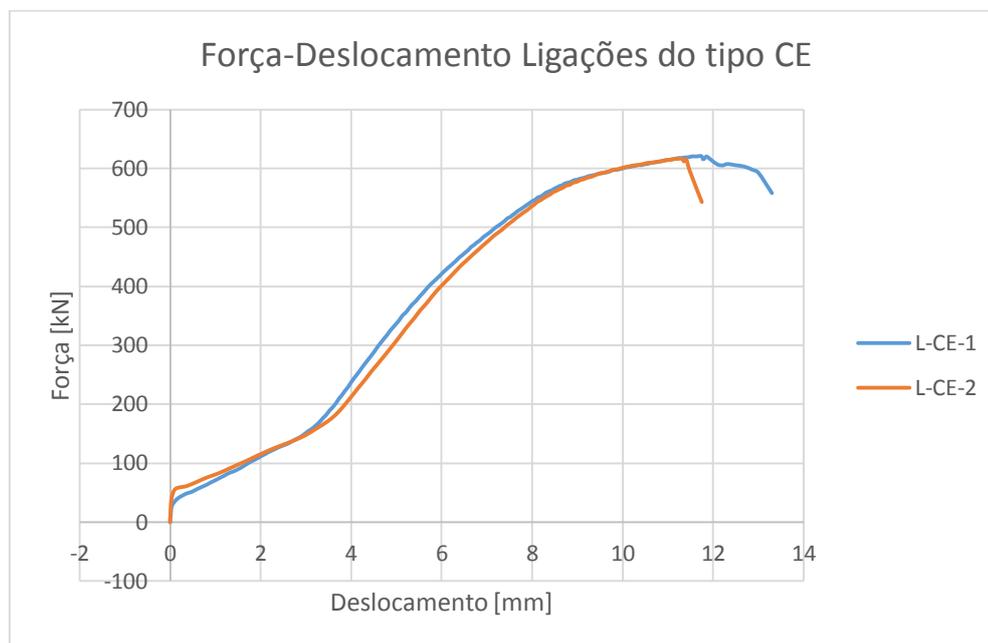


Figura 4.53 - Força-Deslocamento (Média) Ligações do tipo CE

Comparando as curvas força-deslocamento para cada tipo de ligação usada (tipo SH e CE), nota-se que estas apresentam comportamentos semelhantes, apesar da curva do ensaio L-SH-1 não acompanhar a curva do ensaio L-SH-2 até ao final. Isto deve-se ao facto de o ensaio L-SH-1 ter sido o primeiro ensaio de ligações realizado, onde não se introduziram chapas de apoio aos defletómetros, que a partir de uma certa deformação da ligação saíram dos apoios, não sendo possível a partir desse ponto obter dados válidos para os deslocamentos. Esse problema foi resolvido nos ensaios das restantes ligações, onde se introduziram chapas de apoio maiores, para evitar a perda de dados. A Figura 4.54 seguinte mostra o primeiro ensaio sem chapas e um outro já com essas chapas de apoio, de modo a perceber-se melhor o que ocorreu durante o ensaio da Ligação L-SH-1 para existirem aquelas diferenças notáveis.

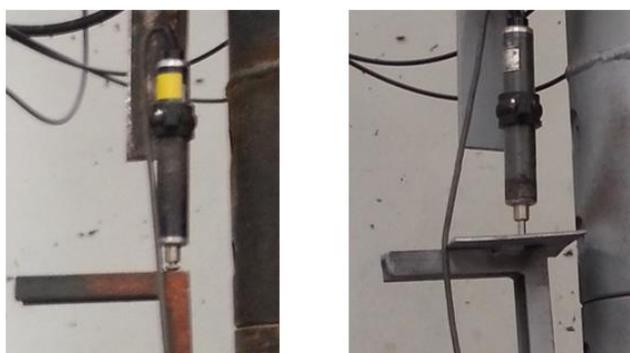


Figura 4.54 – Diferença entre 1º ensaio sem Chapa e Restantes com Chapa de Apoio

Todos os ensaios de ligações apresentam forças máximas aplicadas pela máquina próximas, como se pode ver na Tabela 4.9.

Força Máxima Atingida [kN]			
L-SH-1	L-CE-1	L-CE-2	L-SH-2
591.94	621.05	616.59	634.16

Tabela 4.9 - Força Máxima Atingida [kN]

Dos dados obtidos pelos extensómetros eléctricos traçaram-se curvas Força-Extensão. É importante indicar que se posicionou cada uma das ligações na máquina de testes para que todos os extensómetros se encontrassem posicionados da mesma forma, relativamente a todas as ligações. Assim, cada ligação apresentava os extensómetros no tubo estrutural de espessura  $t = 4$  mm posicionado logo acima da garra inferior da máquina, estando no lado posterior do tubo e outro no lado direito, em relação à vista de frente da máquina de testes. Para melhor ilustrar a posição relativa dos extensómetros encontra-se um esquema na figura 4.55.

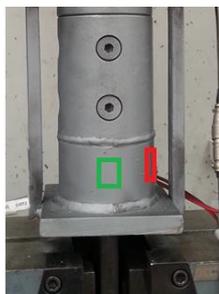


Figura 4.55 - Posição relativa dos extensómetros em função da colocação da ligação na máquina

Na Figura 4.55 pode-se ver a posição do extensómetro eléctrico colocado na parte de trás do tubo estrutural inferior assinalado com um retângulo verde. O extensómetro localizado na zona direita do tubo estrutural (a  $90^\circ$  do outro) está assinalado com um retângulo vermelho.

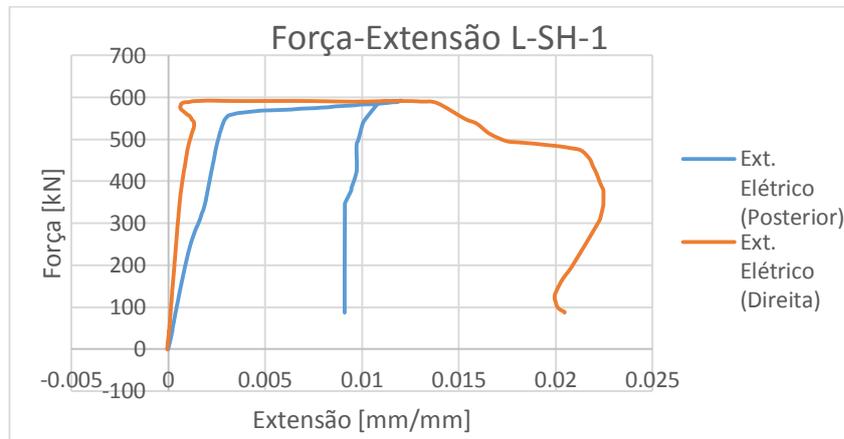


Figura 4.56 – Força-Extensão L-SH-1

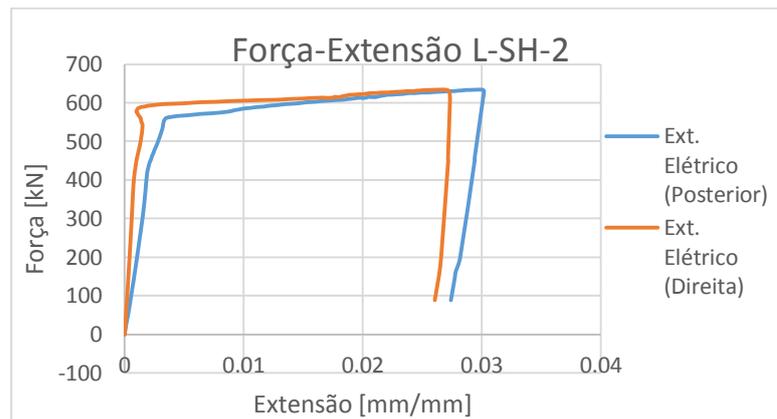


Figura 4.57 – Força-Extensão L-SH-2

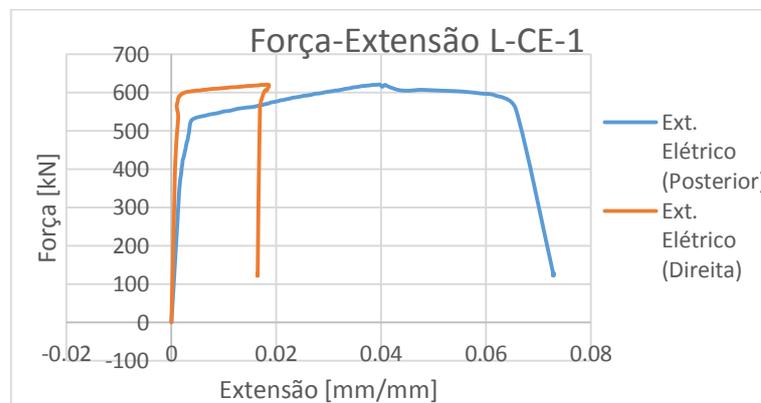


Figura 4.58 – Força-Extensão L-CE-1

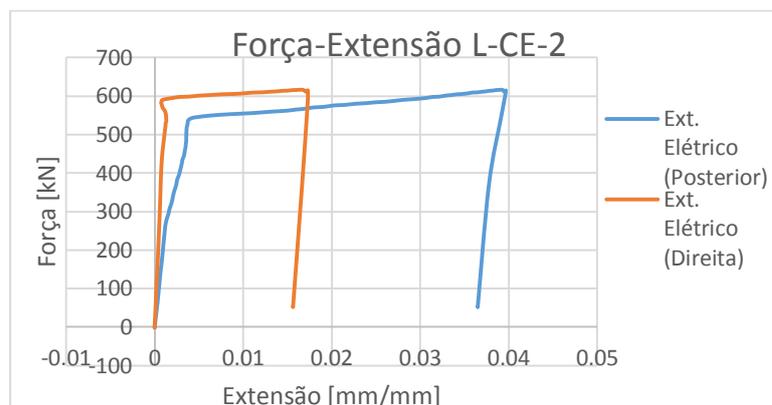


Figura 4.59 – Força-Extensão L-CE-2

Analisando as curvas Força-Extensão pode-se concluir que o extensómetro colocado na zona posterior do tubo estrutural em relação à máquina de testes apresenta maiores extensões em comparação com o extensómetro colocado no lado direito do tubo. Isto deve-se ao facto de a chapa onde a máquina agarra transmitir maiores esforços para as zonas frontal e posterior do tubo em comparação com as zonas esquerda e direita, produzindo então maiores tensões, que conduzem a maiores extensões.

Na Figura 4.60 pode-se observar a deformação da chapa soldada ao tubo no fim de um ensaio, que ajuda a melhor entender os dados compilados nas curvas Força-Extensão.



Figura 4.60 - Deformação final zona de rotura

As Figuras 4.61, 4.62, 4.63 e 4.64 apresentam uma compilação de fotos tiradas em cada ensaio das ligações, que mostram a deformação final e rotura local de cada uma das ligações.



Figura 4.61 - Deformação Final (esquerda) e Rotura Local (direita) - Ligação SH-1



Figura 4.62 – Proverte Inicial (esquerda) e Rotura Local (direita) - Ligação SH-2



Figura 4.63 - Deformação Final (esquerda) e Rotura Local (direita) - Ligação CE-1



Figura 4.64 - Deformação Final (esquerda) e Rotura Local (direita) - Ligação CE-2

Como se pode verificar, todas as ligações romperam pelo tubo estrutural como previsto, à exceção da Ligação SH-2, que rompeu pelas chapas interiores. Isto deveu-se, provavelmente, ao facto de existirem algumas imperfeições derivadas da execução das chapas, que podem ter enfraquecido uma delas. Ao romper a primeira chapa interior dá-se a transferência de grandes tensões para as outras 3 restantes, que cedem todas elas até à rotura da ligação.

Mesmo assim, através da análise das curvas Força-Extensão, pode-se ver que o comportamento da ligação é comparável ao das outras que romperam pelo tubo estrutural.

## 5 ANÁLISE COMPARATIVA COM ETAPAS ANTERIORES DE DESENVOLVIMENTO DA LIGAÇÃO

Os resultados obtidos através do procedimento analítico, segundo o Eurocódigo 3 parte 1-8 podem ser consultados na Tabela 5.1. É importante referir que o cálculo das resistências de cada componente da ligação foi realizado adotando um fator  $\gamma_{M2}$  igual a 1 (em vez de 1,25 como presente no Eurocódigo 3), uma vez que não se pretende obter as resistências de projeto, mas sim resistências que podem ser comparadas diretamente com as forças máximas obtidas nos ensaios experimentais.

É também importante referir que todas as resistências de cada uma das componentes da ligação foram calculadas usando os parâmetros reais obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais, à exceção das áreas dos parafusos nas zonas roscadas, em que se utilizou valores nominais tabelados.

<b>Componentes</b>	<b>Ligações SH-1 e SH-2</b>	<b>Ligações CE-1 e CE-2</b>
<b>Parafusos ao Corte [kN]</b>	751.15	749.90
<b>Chapas ao Esmagamento [kN]</b>	925.81	925.81
<b>Rotura em Bloco das Chapas Interiores [kN]</b>	2057.53	2057.53
<b>Secção (t = 4mm) em Tração [kN]</b>	582.52	582.52

Tabela 5.1 - Resultados Analíticos

Analisando os resultados analíticos conclui-se que a componente mais fraca das ligações é a secção do tubo exterior de 4 mm de espessura sujeita à tração, considerando-se o valor de 582.52 kN como o valor de resistência das ligações.

Também comparando os valores máximos obtidos de força através das curvas força-deslocamento anteriormente apresentadas com os valores máximos obtidos em dissertações anteriores que estudaram o mesmo tipo de ligação, mas com chapas interiores de inferior espessura (comparando com a dissertação “*Study of Splice Bolted Connections in Truss Steel Structures with Hollow Sections*” de Silva, J, 2014, que se trata do desenvolvimento anterior a esta presente dissertação), pode-se também chegar à conclusão que a capacidade resistente da

ligação foi consideravelmente aumentada alterando a espessura das chapas interiores para 8 mm, como se pode ver analisando as Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4.

	Ligação SH-1	Ligação SH-2	Ligação CE-1	Ligação CE-2
<b>Experimental [kN]</b>	592.52	634.16	621.05	616.59
<b>Analítico [kN]</b>	582.52	582.52	582.52	582.52
<b>Rácio</b>	0.98	0.92	0.94	0.94

Tabela 5.2 – Comparação de resultados experimentais e analíticos obtidos nesta dissertação

	M12-CE-Chapas t = 6mm	M12-SH-Chapas t = 6mm	M16-CE-Chapas t = 6mm	M16-SH-Chapas t = 6mm
<b>Experimental [kN]</b>	330.17	351.12	370.55	351.08
<b>Analítico [kN]</b>	323.71	323.71	333.07	333.07
<b>Rácio</b>	0.98	0.92	0.90	0.95

Tabela 5.3 – Comparação de resultados experimentais e analíticos obtidos por Silva, J., 2014

<b>1) Ligação SH-1 [kN]</b>	592.52	<b>4) Ligação CE-1 [kN]</b>	621.05
<b>2) Ligação SH-2 [kN]</b>	634.16	<b>5) Ligação CE-2 [kN]</b>	616.59
<b>3) M16-SH-Chapas t = 6mm [kN]</b>	351.08	<b>6) M16-CE-Chapas t = 6mm [kN]</b>	370.55
<b>Rácio Comparação 1) com 3)</b>	1.69	<b>Rácio Comparação 4) com 6)</b>	1.68
<b>Rácio Comparação 2) com 3)</b>	1.81	<b>Rácio Comparação 5) com 6)</b>	1.66

Tabela 5.4 – Comparação com etapa anterior de desenvolvimento

Através da comparação entre resultados experimentais e analíticos é possível afirmar que ambos produzem resultados muito próximos, concluindo-se que a formulação dada pelo Eurocódigo 3 é aplicável a este tipo inovador de ligação.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente no decorrer desta dissertação com resultados experimentais anteriormente obtidos em etapas anteriores de desenvolvimento é possível observar que aumentando a espessura das chapas interiores (neste caso de 6 mm para 8 mm), aumenta-se substancialmente a capacidade resistente da ligação, sendo o passo seguinte num processo de otimização do comportamento da ligação em estudo.

## 6 CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha por objetivo a análise experimental de um tipo inovador de ligação de emenda entre perfis tubulares circulares utilizados em estruturas em treliça, submetidas a esforço axial. A ligação é aparafusada com chapa cobre junta e parafusos radiais

A análise experimental realizada permitiu chegar às seguintes conclusões acerca da ligação em estudo:

- Face à última etapa do referido estudo de otimização, conclui-se ao aumentar o diâmetro dos parafusos e a espessura das placas interiores (para M16 e 8mm, respetivamente), a rotura da ligação passa a acontecer pelos perfis tubulares circulares a ligar.
- A ligação em estudo pode ser dimensionada de acordo com os pressupostos presentes no Eurocódigo 3 relativos às ligações de emenda aparafusadas ao corte, obtendo-se resultados muito fiáveis e com margens de erro praticamente desprezáveis.
- As ligações que utilizam parafusos do tipo “*Socket Head*” apresentam um ligeiro ganho em termos de rigidez, devido à menor rotação dos mesmos. Isto deve-se à geometria da cabeça do parafuso, que se insere melhor no tubo estrutural, em comparação com os parafusos de Cabeça de Embeber, obtendo-se um ganho em termos de rigidez da ligação.
- A ligação em estudo demonstra ser uma ligação de alto desempenho estrutural e de grande valor estético, uma vez que a emenda entre perfis tubulares se torna quase impercetível.

## 7 PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para futuros desenvolvimentos propõe-se:

- Realizar novos modelos numéricos e melhorar os já existentes e calibra-los com os dados obtidos através dos ensaios de caracterização dos materiais (aço e parafusos);
- Aumentar a escala da ligação e estudar o seu comportamento, comparando os resultados com os anteriormente obtidos, de forma a concluir se o comportamento se mantém;
- Realizar um estudo paramétrico da ligação, fazendo variar as dimensões das várias componentes da mesma (parafusos, chapas, tubos estruturais) e as classes do aço utilizado;
- Realizar um modelo numérico a três dimensões que represente a totalidade da ligação.
- Estudar a ligação existente quando submetida a diferentes tipos de esforços ou a uma combinação de vários tipos de esforços (por exemplo, adicionar momento fletor ao esforço axial e estudar a ligação);
- Utilizar outros tipos de secções tubulares, tais como quadrangulares e retangulares e comparar os resultados com os já obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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

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.

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

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.

Lecce, M. e Packer, J. (2002). “Pole Splices Using Stainless Steel Nails”. CIDECT Repor8F-10/2.

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

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.

Fcporto@.<[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Est%C3%A1dio\\_do\\_Drag%C3%A3o\\_\(8468978586\).jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Est%C3%A1dio_do_Drag%C3%A3o_(8468978586).jpg)> Acesso em: 10 Abril de 2015.

Unique-design@<<http://www.unique-design.co.uk/wp-content/uploads/2013/01/fsf8.jpg>> Acesso em: 16 Abril de 2015.

Lindapter@ <<http://www.lindapter.com/images/products/additional/blowup/342.jpg>> Acesso em 16 Abril de 2015.

Wermac@<[http://www.wermac.org/flanges/flanges\\_pipe-connections\\_pipe-flanges.html](http://www.wermac.org/flanges/flanges_pipe-connections_pipe-flanges.html)>  
Acesso em: 16 Abril 2015.

Portal-energia@<<http://www.portal-energia.com/wp-content/uploadsthumbs/sierra-ministra.jpg>> Acesso em: 16 Abril de 2015.

metalica@ <<http://www.metalica.com.br/artigos-tecnicos/parafusos>> Acesso em: 13 Abril de 2015.

Simões da Silva, L., Simões, R. and Gervásio, H. (2010). “Design of Steel Structures” ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 1st Edition, 2010.

Simões, R., Jordão, S., Freitas, P. (2013). “Avaliação do Comportamento de Ligações de Emenda entre Perfis Tubulares”. IX Conference on Steel and Composite Construction & I Luso-Brazilian Conference on Sustainable Steel Construction, 2013.

Dias da Silva, V. (2004). “Mecânica e Resistência dos Materiais”, 3ª Edição (2004).

Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço. Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios (2010).

Eurocódigo 3 – Projecto de Estruturas de Aço. Parte 1-8: Projecto de Ligações (2010).

bontinck@ <<http://www.bontinck.biz/en/projects/non-residential/1998-pier-a-zaventem/more-images>> Acesso em: 7 de Julho de 2015.

Simões, R. (2014). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”, 3ª Edição (2014).

Simões, R., Jordão, S., Silva, J. (2014). “Comportamento Experimental de Configurações Inovadoras de Ligações de Emenda em Perfis Tubulares”. 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, (2014).

fec.unicamp@<<http://www.fec.unicamp.br/~estruturastubulares/terminalinternacionaldeguara-rapes.html>> Acesso em: 9 de Julho de 2015

Amparo, L. (2014). “Análise Teórico-Experimental de Ligações Tipo Luva Compostas Por Perfis Tubulares Com Parafusos Em Linha e Cruzados”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, Brasil.