



# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS EM PERFIS DE ALUMÍNIO APLICADOS EM SUPERESTRUTURAS DE AUTOCARROS

ANDRÉ MATIAS DE CASTRO COSTA

outubro de 2019

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGAÇÕES  
APARAFUSADAS EM PERFIS DE ALUMÍNIO APLICADOS  
EM SUPERESTRUTURAS DE AUTOCARROS**

André Matias de Castro e Costa

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LIGAÇÕES APARAFUSADAS EM PERFIS DE ALUMÍNIO APLICADOS EM SUPERESTRUTURAS DE AUTOCARROS**

André Matias de Castro e Costa  
1110456

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Prof. Fernando José Ferreira.

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

## JÚRI

### **Presidente**

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Orientador**

Doutor Fernando José Ferreira

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

### **Arguente**

Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

Quero dirigir os meus principais agradecimentos ao Professor Fernando Ferreira pela disponibilidade e contribuição em todo o percurso na elaboração deste trabalho.

Tenho também todo o gosto em agradecer ao Departamento de Engenharia da CaetanoBus pelo suporte técnico e pela disponibilização das amostras dos materiais contemplados neste estudo.

Quero também agradecer ao Professor Arnaldo Guedes Pinto pelo apoio na orientação dos ensaios laboratoriais.



## PALAVRAS CHAVE

Ligação Perfis Alumínio, Superestruturas de Autocarros, Ligações Aparafusadas, *Co-Bolt®*, *Regulamento UNECE R66*, Ensaio Laboratoriais, Método dos Elementos Finitos, Análise Computacional, *Ansys Workbench®*..

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento de ligações entre elementos estruturais. Esses elementos fazem parte de um kit de perfil de alumínio estrutural conhecido comercialmente como "Co-Bolt", que foi patenteado pela Hess AG. Essa designação está relacionada ao tipo de conexão dos perfis de alumínio. Os perfis têm uma secção transversal particular que contempla umas calhas permitindo uma ligação aparafusada entre os perfis. Essas ligações usam reforços triangulares parafusos e fêmeas. Essa tecnologia é aplicada em estruturas de autocarros, onde sistemas semelhantes podem ser encontrados em perfis tipo Bosch para a estruturas de máquinas.

Este trabalho vem no âmbito de um desafio proposto pela empresa CaetanoBus com o objetivo de ser ponto inicial no desenvolvimento de um novo projeto usando este tipo de solução estrutural. O objetivo final da empresa é desenvolver uma estrutura que contempla essa tecnologia e a aprovação do Regulamento 66 .

Na revisão bibliográfica será apresentada o Estado da Arte das carroçarias de autocarros, fazendo uma abordagem do tipo de indústria, tipos de chassis e típicas soluções construtivas das carroçarias.

Será também mencionado o Regulamento 66. Este regulamento estabelece os parâmetros de resistência de uma estrutura de autocarros em situação de capotamento. Neste capítulo será apresentado o tema sobre ligas de alumínio e tratamentos térmicos de perfis obtidos por extrusão.

No final deste capítulo será apresentado o tema sobre ligações aparafusadas.

Nos capítulos de desenvolvimento serão apresentados todos os elementos de uma carroçaria construída com a tecnologia Co-Bolt.

Serão apresentados os testes físicos e de todas as atividades complementares assim como uma simulação numérica não linear com o objetivo de relacionar com resultado do teste físico.



**KEYWORDS**

Connection Aluminum Profiles, Bus Superstructure, Bolted Connections, *Co-Bolt*, *UNECE Regulation R66*, Laboratory Tests, Finite Element Method, Computational Analysis, *Ansys Workbench*® ..

**ABSTRACT**

The main goal of this work is to evaluate the behavior of the connection of some structural elements. These elements are part of a structural aluminum profile kit commercially known as "Co-Bolt", which was patented by Hess AG.

This designation is related to the type of the aluminum profiles connection. The profiles have a particular cross-section which have a rail-shaped area, allowing a bolted connection between profiles. These connections use triangular reinforcements and threaded fasteners. This technology is applied in bus structures, where similar systems can be found in Bosch's profiles for machine base structure.

This work comes within the scope of a challenge proposed by CaetanoBus company with the goal of being a kick-off in the development of a new project using this type of structural solution. The ultimate goal for the company is to develop a complete body structure using this technology and get the Regulation 66 rollover approval.

The State of the Art of bus bodies will be presented in the bibliographic review, approaching the chassis industry and body construction solutions regularly used.

Regulation 66 will also be mentioned, on which establishes the requirements for the behavior of a bus structure in a rollover situation.

This chapter will cover aluminum alloys and heat treatment of extruded profiles as well as bolted connection approach.

The elements of Co-Bolt technology built bus will be introduced in the development chapter.

A presentation of the physical testing and all complementary activities will lead to the last step of this chapter, describing a numerical nonlinear simulation with the goal of approaching the obtained physical test result, allowing us to validate the numerical analysis method.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

R66	Regulamento 66
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
MEF	Método de Elementos Finitos
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto

### Lista de Unidades

m	Metro
mm	Milímetro
N	Newton
kg	Quilograma
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal

### Lista de Símbolos

$T$	Binário de aperto
$P$	Pré-Carga do parafuso
$K$	Coefficiente de torque
$D$	Diâmetro nominal
$p$	Passo da rosca
$\mu_t$	Coefficiente atrito entre roscas
$r_t$	Raio de contacto efetivo entre roscas
$\beta$	Semi-ângulo das roscas
$\mu_n$	Coefficiente de atrito entre a face da fêmea e superfície de contacto
$r_n$	Raio efetivo da área de contacto entre a fêmea e superfície de apoio



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – “A EVOLUÇÃO DA ESPÉCIE” [3]	29
FIGURA 2 – EXEMPLO DE UM MANUAL DO CARROÇADOR SCANIA [4]	30
FIGURA 3 – EXEMPLO DE CHASSI TIPO LONGARINAS	30
FIGURA 4 – EXEMPLO DE CHASSI TIPO “MISTO”	31
FIGURA 5 – EXEMPLO DE CHASSI PLATAFORMA	31
FIGURA 6 – EXEMPLO DE CHASSI DE UM AUTOCARRO DE PLACA	32
FIGURA 7 – ESTRUTURA DE UMA CARROÇARIA DE UM AUTOCARRO DE TURISMO	33
FIGURA 8 – SECÇÕES DE UM VEÍCULO PESADO DE PASSAGEIROS [1]	34
FIGURA 9 – PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DAS ROTULAS PLÁSTICAS NUM SEGMENTO [2]	36
FIGURA 10 – DEFINIÇÃO DA SUPERESTRUTURA A PARTIR DA CARROÇARIA [2]	36
FIGURA 11 –ESPECIFICAÇÃO DE ESPAÇO RESIDUAL, A) E C) DISPOSIÇÃO LATERAL [2]	37
FIGURA 12 –REPRESENTAÇÃO DO ENSAIO DE CAPOTAMENTO COM UM VEÍCULO COMPLETO [2]	38
FIGURA 13 –GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE AÇO E ALUMÍNIO DA TENSÃO VS DEFORMAÇÃO [8]	39
FIGURA 14 –MATRIZ DE EXTRUSÃO [14].	46
FIGURA 15 – <i>BILETES</i> [16].	46
FIGURA 16 – SOLICITAÇÕES EM JUNTAS APARAFUSADAS [17].	47
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS DE UMA JUNTA COM PARAFUSO ANILHA E FÊMEA.	47
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DE UMA LIGAÇÃO	51
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA COMPLETA DE UM AUTOCARRO	51
FIGURA 20 – DIAGRAMA CARACTERÍSTICO DE UMA RÓTULA PLÁSTICA [2]	57
FIGURA 21 – PORÇÃO DA SUPERESTRUTURA	58
FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO A PORÇÃO DA ESTRUTURA ENSAIADA	58
FIGURA 23 – PORÇÃO DA ESTRUTURA ENSAIADA	59
FIGURA 24 - MÁQUINA DE ENSAIO <i>SHIMADZU AG-X 100 KN</i>	60
FIGURA 25 – PRIMEIRO CONCEITO DO DISPOSITIVO DE APOIO AO ENSAIO	61
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DO MODO DE APLICAÇÃO DA FORÇA NA LIGAÇÃO	61
FIGURA 27 – MONTAGEM DO PRIMEIRO CONCEITO DO SUPORTE.	62
FIGURA 28 – SUPORTE DE LIGAÇÃO DA FITA AO PERFIL.	62
FIGURA 29 – EXECUÇÃO DA ALTERAÇÃO DO MECANISMO DE GUIA	63
FIGURA 30 – VERIFICAÇÃO DO BINÁRIO DE APERTO NAS LIGAÇÕES	63
FIGURA 31 -MONTAGEM GERAL DA BANCA DE ENSAIO	64
FIGURA 32 – MONTAGEM PARA ENSAIO PRELIMINAR	65
FIGURA 33 – MOMENTO QUANDO A ESTRUTURA ENTRA EM INSTABILIDADE 1º ENSAIO	65
FIGURA 34 – CURVAS MOMENTO-ANGULO DE ROTAÇÃO DO ENSAIO PRELIMINAR	66
FIGURA 35 – A) CANTO PERFIL TEJADILHO B) CANTO PERFIL DA JANELA C) FÊMEA D) PARAFUSO M8	67
FIGURA 36 – SENTIDOS DE SOLICITAÇÃO MAIS COMUNS EM SITUAÇÃO DE CAPOTAMENTO	67
FIGURA 37 – REPRESENTAÇÃO DO MODO DE ENSAIO DAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS	68
FIGURA 38 – ALTERAÇÃO DA FIXAÇÃO DO PROVETE	68
FIGURA 39 – ENSAIO PROVETE 1, MONTAGEM	69

FIGURA 40 – ENSAIO PROVETE 1, INSTANTE ANTERIOR DA ROTURA	70
FIGURA 41 – ENSAIO PROVETE 1, FÊMEA FISSURADA	70
FIGURA 42 – ENSAIO PROVETE 1, FÊMEA COLAPSADA.	71
FIGURA 43 – FÊMEA E PARAFUSO APÓS EXECUÇÃO DO ENSAIO 1	71
FIGURA 44 – ENSAIO PROVETE 2, MONTAGEM	72
FIGURA 45 – ENSAIO PROVETE 2, DEFORMAÇÃO PERFIL B	73
FIGURA 46 – ENSAIO PROVETE 2, APÓS ROTURA	73
FIGURA 47 – ENSAIO PROVETE 2, ROTURA DAS FÊMEAS	73
FIGURA 48 – ENSAIO PROVETE 3, MONTAGEM	74
FIGURA 49 – ENSAIO PROVETE 3, ROTURA DAS FÊMEAS	75
FIGURA 50 – ENSAIO PROVETE 3, ROTURA DO CANTO	75
FIGURA 51 – ENSAIO PROVETE 4, ROTURA DO CANTO E FÊMEAS	76
FIGURA 52 – ENSAIO PROVETE 4, <i>FRAMES</i>	77
FIGURA 53 – CURVAS MOMENTO-ÂNGULO DE ROTAÇÃO DO PROVETE 1 E 2	78
FIGURA 54 – CURVAS MOMENTO-ÂNGULO DE ROTAÇÃO DO PROVETE 3 E 4	80
FIGURA 55 - PERFIS ENSAIADOS	83
FIGURA 56 - MAQUINAÇÃO DOS PROVETES	84
FIGURA 57 - DESENHO COM DIMENSÕES DO PROVETE	84
FIGURA 58 PROVETES PARA OS ENSAIOS	85
FIGURA 59 A) MÁQUINA DE ENSAIO <i>SHIMADZU AG-X 100 KN</i> B) INSTALAÇÃO DO PROVETE	85
FIGURA 60 PROVETES APÓS OS ENSAIOS	86
FIGURA 61 - CURVAS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS PROVETES 1 A 4	86
FIGURA 62 - CURVAS DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DOS PROVETES 6 A 9	87
FIGURA 63 – PRIMEIRA ABORDAGEM DA PREPARAÇÃO GEOMÉTRICA DO MODELO.	92
FIGURA 64 – PRIMEIRA ABORDAGEM DO MODO DE APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA.	93
FIGURA 65 – MODELO SIMPLIFICADO PARA SIMULAÇÃO.	94
FIGURA 66 – MODELO COM MALHA.	94
FIGURA 67 – GRÁFICO <i>MESH METRIC</i> .	95
FIGURA 68 – VISUALIZAÇÃO DOS ELEMENTOS EM FUNÇÃO DA QUALIDADE	95
FIGURA 69 – PARAMETRIZAÇÃO DA LIGA 6060 T6 NO <i>ANSYS WORKBENCH</i> .	96
FIGURA 70 – APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA NO MODELO	97
FIGURA 71 – CONTACTOS DOS ELEMENTOS	97
FIGURA 72 – ESTADO DE TENSÕES PROVETE GLOBAL	99
FIGURA 73 – ESTADO DE TENSÕES PROVETE GLOBAL	99
FIGURA 74 – ESTADO DE TENSÃO, VISTA EM CORTE FÊMEA E PARAFUSO	99
FIGURA 75 – ESTADO DE TENSÃO DOS ELEMENTOS	100

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO PARA PERFIS EXTRUDIDOS [11]	40
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO PARA CHAPAS [11]	41
TABELA 3 – IDENTIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO PARA TRABALHO MECÂNICO [6]	42
TABELA 4 – IDENTIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO DE FUNDIÇÃO[6]	43
TABELA 5 – IDENTIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA[12]	43
TABELA 6 – EXEMPLO DOS TRATAMENTOS POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA [13]	44
TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS [13]	44
TABELA 8 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUMAS LIGAS [6]	45
TABELA 9 – VALORES DE COEFICIENTES DE ATRITO EXPERIMENTAIS DA ROSCA ( $\mu_t$ ) E DA CABEÇA DO PARAFUSO ( $\mu_n$ ) [21]	48
TABELA 10 – IDENTIFICAÇÃO DA SECÇÃO DOS PERFIS EXTRUDIDOS	52
TABELA 11 – IDENTIFICAÇÃO DOS ACESSÓRIOS DE LIGAÇÃO DOS PERFIS	52
TABELA 12 – PROPRIEDADES DOS PERFIS EXTRUDIDOS [7]	53
TABELA 13 – PROPRIEDADES DAS PEÇAS DE FUNDIÇÃO	53
TABELA 14 – RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS ENSAIOS	87
TABELA 15 – LISTA DE MATERIAIS CRIADOS NA BIBLIOTECA DO <i>MECHANICAL ANSYS WORKBENCH.</i>	96



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Motivação e contextualização do tema	25
1.2	Objetivos	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	Arquitetura das superestruturas dos autocarros	29
2.1.1	A indústria transformadora	29
2.1.2	Tipos de chassi	30
2.2	Soluções construtivas em carroçarias de autocarros	33
2.2.1	Arte de carroçar	33
2.3	Regulamento UNECE R66	35
2.3.1	Âmbito de aplicação	35
2.3.2	Definição de superestrutura	35
2.3.3	Espaço residual	37
2.3.4	Especificação do ensaio de capotagem	38
2.4	Perfil de alumínio obtido por extrusão	39
2.4.1	Alumínio	39
2.4.2	Ligas de Alumínio	42
2.4.3	Tratamentos	43
2.4.4	Liga Série 6XXX	45
2.4.5	Princípios da extrusão	46
2.5	Ligações aparafusadas	47
<b>3</b>	<b>TECNOLOGIA CO-BOLT®</b>	<b>49</b>
3.1	Tipologia da estrutura	51
3.2	Elementos constituintes da estrutura	52
<b>4</b>	<b>ENSAIO DA LIGAÇÃO DO PERFIL</b>	<b>55</b>
4.1	Introdução ao ensaio	57
4.2	Desenvolvimento de um dispositivo de apoio ao ensaio	59
4.2.1	Desenvolvimento do dispositivo	61

<b>4.3</b>	<b>Ensaio preliminar</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio das ligações</b>	<b>67</b>
4.4.1	Ensaio do provete 1, perfil da janela com momento positivo	69
4.4.2	Ensaio do provete 2, perfil da janela com momento negativo	72
4.4.3	Ensaio ao provete 3, perfil do tejadilho	74
4.4.4	Ensaio ao provete 4, perfil do tejadilho	76
<b>4.5</b>	<b>Resultados</b>	<b>78</b>
4.5.1	Curva característica da ligação dos perfis de janela	78
4.5.2	Curva característica da ligação dos perfis de tejadilho	80
<b>5</b>	<b>ENSAIOS DE TRAÇÃO</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução dos ensaios de tração</b>	<b>83</b>
<b>5.2</b>	<b>Preparação dos provetes</b>	<b>84</b>
<b>5.3</b>	<b>Execução dos ensaios e resultados</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>89</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução da simulação numérica</b>	<b>91</b>
<b>6.2</b>	<b>Preparação do modelo</b>	<b>92</b>
6.2.1	Modelo 3D e malha	92
6.2.2	Materiais	96
6.2.3	Condições Fronteira	97
<b>6.3</b>	<b>Simulação</b>	<b>98</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusões</b>	<b>105</b>
<b>7.2</b>	<b>Proposta de trabalhos futuros</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>107</b>
<b>8.1</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>
<b>9.1</b>	<b>Gráficos dos ensaios, força vs deslocamento.</b>	<b>113</b>
<b>9.2</b>	<b>Desenhos técnicos.</b>	<b>115</b>





# 1

## INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e contextualização do tema

1.2 Objetivos



## 1.1 Motivação e contextualização do tema

O tema desta tese vem no âmbito de um desafio proposto pela empresa CaetanoBus, entidade construtora de carroçarias de autocarros.

O conteúdo deste trabalho baseia-se no estudo de um perfil em alumínio utilizado pela empresa. Este perfil e respetivos acessórios tem a designação comercial de *Co-Bolt*, é obtido a partir da extrusão em liga de alumínio série 6000, a sua montagem é totalmente aparafusada .

A principal motivação para o desenvolvimento desta tese foi a relação existente da experiência profissional adquirida e os conteúdos abordados em Mestrado.

A empresa tem o objetivo a longo prazo de desenvolver uma solução para aplicar nas suas estruturas que supere determinados resultados comparativamente ao perfil atualmente utilizado.

Este trabalho em parceria com a CaetanoBus servirá como ponto de partida de um longo estudo tendo a empresa o objetivo de atingir a aprovação de uma carroçaria no Regulamento 66 com a utilização de um perfil deste tipo.

As principais razões da insistência na utilização deste tipo de tecnologia são pela garantia do toleranciamento da construção da estrutura e o tipo de processo de montagem.

A empresa utiliza para o cálculo estrutural da superestrutura dos autocarros que projeta análise computacional pelo método dos elementos finitos utilizando para tal o código comercial Ansys Workbench. Pelo facto de o problema computacional ser muito grande são necessárias abordagens simplificadas para o cálculo da superestrutura pelo método de elementos finitos. A superestrutura possui dezenas de perfis e dezenas ligações aparafusadas de grande complexidade de modelação e simulação. Uma vez que a sua simulação rigorosa implica a utilização em análise não linear elástica e material assim como a formulação contacto.

Para levar a cabo a simulação até aos dias de hoje, a empresa assume simplificações que não consideram os elementos de ligação entre perfis como indeformáveis e fazendo recurso da função "*Bonded*" A empresa assume que esta abordagem de cálculo deve ser melhorada.

Os critérios de resistência da estrutura de um autocarro não devem por em causa a segurança dos ocupantes até determinados níveis sendo este tipo de atividade de grande responsabilidade social. A União Europeia impõe regulamentos e diretivas que regulam os critérios de resistência das estruturas assim como aspetos ergonómicos para o condutor e ocupantes.

A aplicação do regulamento UNECE R66 é imprescindível para homologação série de autocarros, assim será feita uma abordagem a este tema neste trabalho.

## 1.2 Objetivos

Como já mencionado anteriormente o tema desta tese baseia-se num estudo do desempenho estrutural das ligações com a tecnologia *Co-Bolt*.

Este estudo será desenvolvido por via da aplicação do método de elementos finitos e por ensaios experimentais.

O principal objetivo é obter as características de deformação reais das ligações. Isto tem propósito de ser um ponto de partida de um projeto a logo prazo no processo de validação de uma carroçaria construída com esta tecnologia tendo em consideração Regulamento 66.

Tem também como objetivo de criar algumas práticas na abordagem das análises não lineares utilizando o *Software* de Elementos Finitos *Ansys Workbench* complementando o procedimento interno da CaetanoBus.

# 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **2.1 Arquitetura das superestruturas dos autocarros**

- 2.1.1 A indústria transformadora
- 2.1.2 Tipos de *chassi*

### **2.2 Soluções construtivas em carroçarias de autocarros**

- 2.2.1 Arte de carroçar

### **2.3 Regulamento *UNECE R66***

- 2.3.1 Âmbito de aplicação
- 2.3.2 Definição de superestrutura
- 2.3.3 Espaço residual
- 2.3.4 Especificação do ensaio de capotagem

### **2.4 Perfil de alumínio obtido por extrusão**

- 2.4.1 Alumínio
- 2.4.2 Ligas de Alumínio
- 2.4.3 Tratamentos
- 2.4.4 Liga Série 6XXX
- 2.4.5 Princípios da extrusão

### **2.5 Ligações aparafusadas**



## 2.1 Arquitetura das superestruturas dos autocarros

O mundo dos transportes está continuamente em evolução. Os primeiros autocarros eram fabricados praticamente em madeira e com algumas partes metálicas de maior solicitação. Entretanto os autocarros sofreram grandes evoluções, a principal evolução foi o abandono das estruturas em madeira tendo sido substituída por perfis em chapas de aço, por revestimentos plásticos e compósitos, entre outros materiais. A evolução ao longo dos tempos permitiu autocarros mais seguros, leves e com maior tempo de vida. Tudo isto fruto do aperfeiçoamento de métodos de construção, melhoria a nível de materiais utilizados e utilização de novos processos de fabrico.

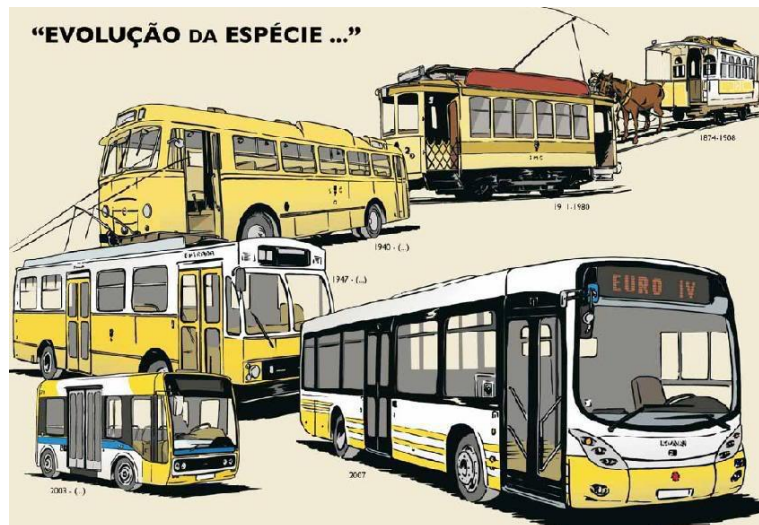


Figura 1 – “A evolução da espécie” [3]

### 2.1.1 A indústria transformadora

A indústria transformadora do ramo automóvel abrange várias tipologias de transformação, desde aqueles que apenas transformam veículos ligeiros de passageiros para veículos ligeiros de mercadorias, construtores de caixas de carga, transformadores de veículos especiais como ambulâncias e veículos de bombeiros, até aos construtores de autocarros. Os veículos pesados de passageiros normalmente são fabricados por duas entidades, o Fabricante do *Chassi* e o Carroçador.

O *chassi* encontra-se acompanhado com um manual do carroçador. Nele serão descritos aconselhamentos e obrigatoriedades que o construtor deverá contemplar.

### 2.1.2 Tipos de *chassi*

Esta estrutura tem como objetivo principal suportar todos os componentes mecânicos relativos a mobilidade do veículo como por exemplo, motor, caixa de velocidades, suspensões, depósito de combustível. Terá de sustentar o peso da superestrutura assim como o dos passageiros e bagagens. Além disso terá de suportar esforços de torsão e de flexão em conjunto com a carroçaria.

A forma de fazer ligações do *chassi* à carroçaria normalmente é regulada pelo manual do carroçador, como dito anteriormente fornecido pelo fabricante de *chassis*.

O manual do carroçador é dividido em capítulos que descreve a preparação do *chassi* a ser carroçado, a montagem da carroçaria no *chassi*, pavimento e isolamento, sistemas de combustível e motor, ar comprimido e suspensão, sistemas de controlo, sistema de climatização, área do motorista, sistemas elétricos e manutenção



Figura 2 – Exemplo de um manual do carroçador Scania [4]

Neste ramo, normalmente, são carroçados três tipos de *chassi*, em forma de longarinas, o *chassi* “misto” e o *chassi* com plataforma totalmente rebaixada.

O *chassi* do tipo longarinas normalmente é utilizado em autocarros de turismo, pois estes usam um pavimento a um nível superior ficando assim o volume inferior disponível para as bagageiras.



Figura 3 – Exemplo de *chassi* tipo longarinas

O *chassi* intitulado neste trabalho como “misto” é mais utilizado em autocarros de circulação urbana. Este tem a particularidade de ter uma plataforma rebaixada de fácil acesso ao fluxo de passageiros. Como podemos observar na Figura 4 o chassi é composto por dois módulos. Na parte traseira o chassi usa umas longarinas onde nesta zona são alojados a maioria dos componentes, como por exemplo, motor e caixa de velocidades. O módulo dianteiro tem um piso rebaixado em que este é ligado ao módulo traseiro através de um estrado que este definirá a distância entre eixo.



Figura 4 – Exemplo de chassi tipo “misto”

O *chassi* com plataforma totalmente rebaixada, normalmente é utilizado quando se pretende carregar um autocarro urbano com uma porta atrás do eixo traseiro não obrigando este ao uso de degraus nem rampeados na zona da coxa. Os componentes mecânicos, nomeadamente o motor, caixa de velocidades e o radiador, são colocados com uma disposição mais apertada na traseira num dos lados do chassi, dependendo do Layout definido.



Figura 5 – Exemplo de chassi plataforma

Um chassi diferente que embora siga a mesma filosofia de montagem do chassi “Misto”, é o *chassi* dos autocarros de placa, mais concretamente o chassi utilizado nos autocarros de aeroporto. Este *chassi* é aplicado em veículos com um mercado muito específico. O autocarro de placa com o uso deste *chassi* tem a particularidade de os componentes motrizes serem posicionados na parte dianteira assim como a sua tração é feita pelo eixo dianteiro. Além disso é um chassi que usa uma carroçaria bastante modular utilizando um perfil do tipo *Co-Bolt*. Este perfil permite adaptar com bastante facilidade o posicionamento das portas, das janelas e o entre eixo. O habitáculo do motorista é totalmente isolado da área ocupada por passageiros. O carroçamento deste tipo de veículos tem menos restrições quanto às normas definidas em regulamentação comparativamente aos veículos que circulam em via pública.

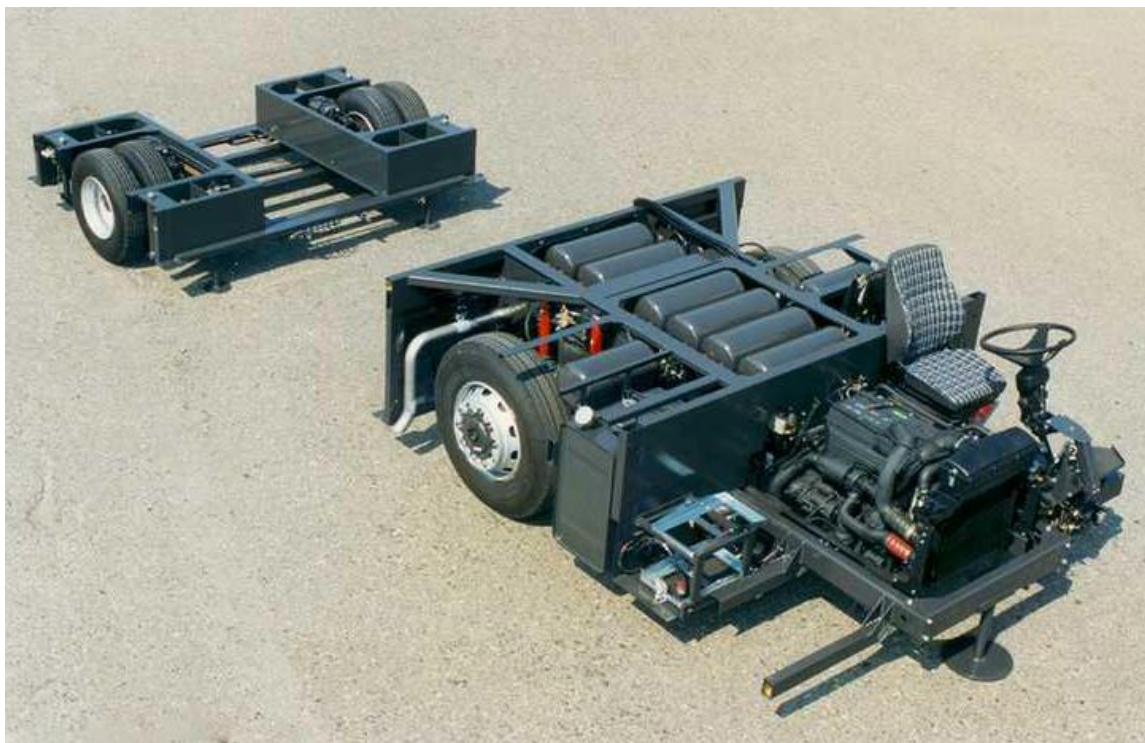


Figura 6 – Exemplo de chassi de um autocarro de placa

## 2.2 Soluções construtivas em carroçarias de autocarros

Neste ponto será feita uma breve apresentação sobre as principais características de uma carroçaria, quanto aos elementos estruturais, preparação de *chassi* e processo de montagem.

### 2.2.1 Arte de carroçar

A arte de carroçar baseia-se na aplicação de uma estrutura, seja ela para transporte de passageiros ou de mercadoria, sobre um *chassi* fornecido por um fabricante.

A carroçaria deverá ser projetada tendo em consideração normas estabelecidas pelo manual do carroçador. As normas definem os pontos disponíveis de ancoragem do *chassi*, zonas de corte e metodologia de ligação (soldadura, rebites e parafusos).

A estrutura das carroçarias de autocarros, mais vulgarmente conhecida por “gaiola”, são normalmente obtidas por construção soldada, constituídas por painéis fabricados com tubos de secção quadrada. Os painéis são eles, o tejadilho, frente, traseira e as laterais.

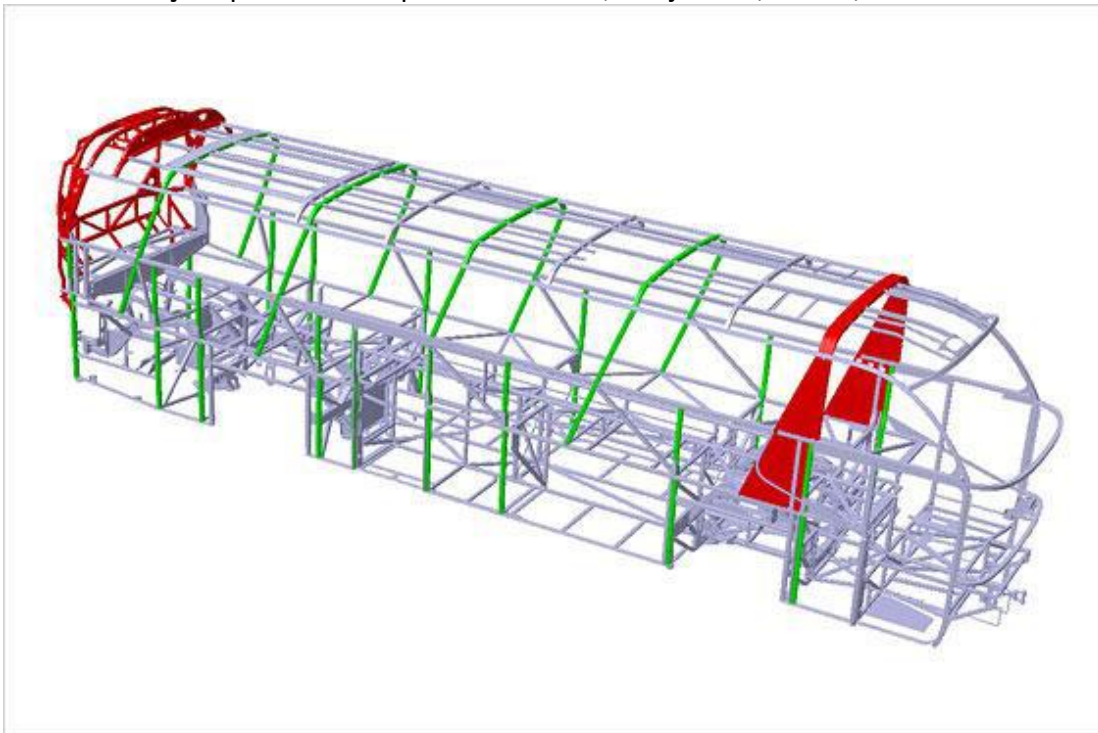


Figura 7 – Estrutura de uma carroçaria de um autocarro de turismo

No projeto deste tipo de estruturas o peso merecerá especial atenção tendo em conta as limitações do *chassi* e a lotação de passageiros pretendida.

O desenho baseia-se na projeção de tubos transversais, longitudinais e treliças, estes definem o conceito dos elementos conhecidos por arco de segurança, montante e treliça. As ligações entre tubos são tipicamente feitas em formas de “T”, “K” e cotovelo como pode ser verificado na Figura 8.

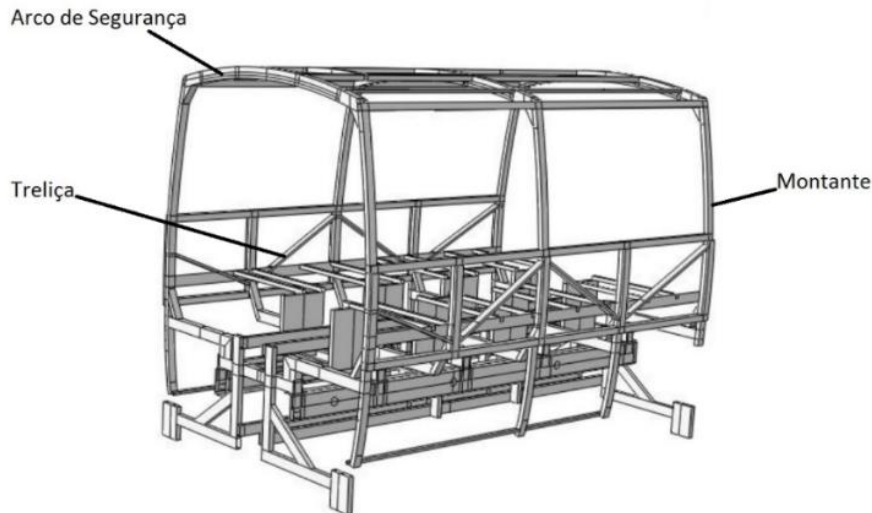


Figura 8 – Secções de um veículo pesado de passageiros [1]

Quanto à preparação do chassis, ela tem o objetivo de criar condições para receber a gaiola. Uma típica preparação de chassis, é começada pelo alinhamento e nivelamento do módulo dianteiro e traseiro tendo em conta o entre eixo definido pelo carroçador e as cotas de posicionamento presentes no desenho fornecido pelo fabricante de chassis. Depois de assegurado o correto posicionamento é aplicado o estrado de alongamento. Este é o responsável pela ligação do módulo dianteiro com o traseiro. Posto isto o chassis tem as condições necessárias para receber a gaiola.

O processo de fabricação de uma carroçaria adota uma tecnologia bastante rudimentar visto que está inserido num nicho de mercado em que o volume de produção muitas das vezes não justifica aplicação de tecnologia mais avançada. Um autocarro normalmente é construído numa linha de produção ou, de uma forma mais artesanal, poderá ser construído num só posto. A primeira etapa da conceção baseia-se na construção da gaiola. São construídos os painéis e os estrados complementares do pavimento em gabaris independentes que à posteriori serão montados entre si. De seguida será preparado o chassis para receber a gaiola dando seguimento à montagem das partes “semi-estruturais”, por exemplo revestimento exterior e interior em compósito ou em chapas simples de alumínio ou aço. Concluída a montagem da estrutura é aplicado o tratamento anticorrosivo e pintura, dando seguimento para área dos acabamentos. Nesta fase são montados todos componentes que oferece comodidade aos ocupantes, desde o tapete do pavimento, forras interiores, bancos, aparelhos audiovisuais, iluminação etc....

No final do carroçamento o autocarro é levado para um laboratório onde é testado e validado de acordo com a legislação aplicável e os padrões de qualidade definidos pela entidade construtora.

## 2.3 Regulamento UNECE R66

### 2.3.1 Âmbito de aplicação

O Regulamento UNECE R66 – Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas, tem como objetivo quanto à sua aplicação, a definição de parâmetros e procedimentos no processo de homologação relativa à resistência da superestrutura “a veículos rígidos ou articulados de um só piso das categorias M2 ou M3, classes II ou III, ou classe B, com mais de 16 passageiros.”[2]. Esta homologação é validada através de um ensaio de capotamento ou ensaio equivalente tendo em conta três parâmetros, resistência estrutural, energia de referência e espaço residual.

### 2.3.2 Definição de superestrutura

Uma superestrutura de um veículo pesado de passageiros tem por definição do fabricante todos os componentes da carroçaria com desempenho estrutural que condicionam a resistência e a capacidade de absorção de energia.

Em projeto são tidas em consideração as zonas de deformação programada. Tendo em conta o regulamento existem as zonas plásticas (PZ) [2], sendo esta uma zona limitada geometricamente e onde há grandes deformações plásticas, existem também as rótulas plásticas (PH), tendo em conta o R66 “*designa uma zona plástica simples formada num elemento linear da estrutura (tubo simples, montante de janela, etc.)*”[2] ver figura 9.

O objetivo da sua definição tem como base a preservação do espaço residual em capotamento. “*Segmento designa uma secção da superestrutura que forma um quadro fechado entre dois planos perpendiculares ao plano longitudinal vertical médio do veículo. Um segmento inclui um montante de janela (ou porta) em cada lado do veículo, assim como elementos das paredes laterais, uma secção da estrutura do tejadilho e uma secção do piso e da estrutura de suporte do piso.*”[2]. “*Secção da carroçaria designa uma unidade estrutural que representa uma parte da superestrutura para efeitos de um ensaio de homologação. Uma secção da carroçaria inclui, pelo menos, dois segmentos ligados por elementos de conexão representativos (laterais, tejadilho e estrutura de suporte do piso).*”[2] ver Figura 10.

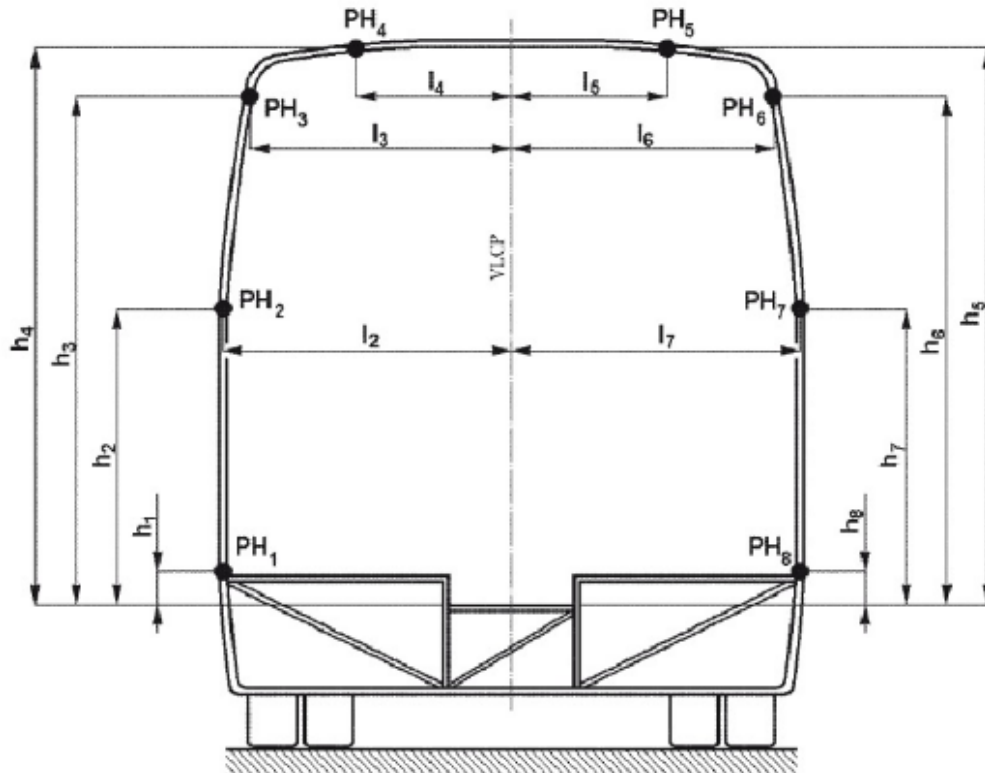


Figura 9 – Parâmetros geométricos das rotulas plásticas num segmento [2]

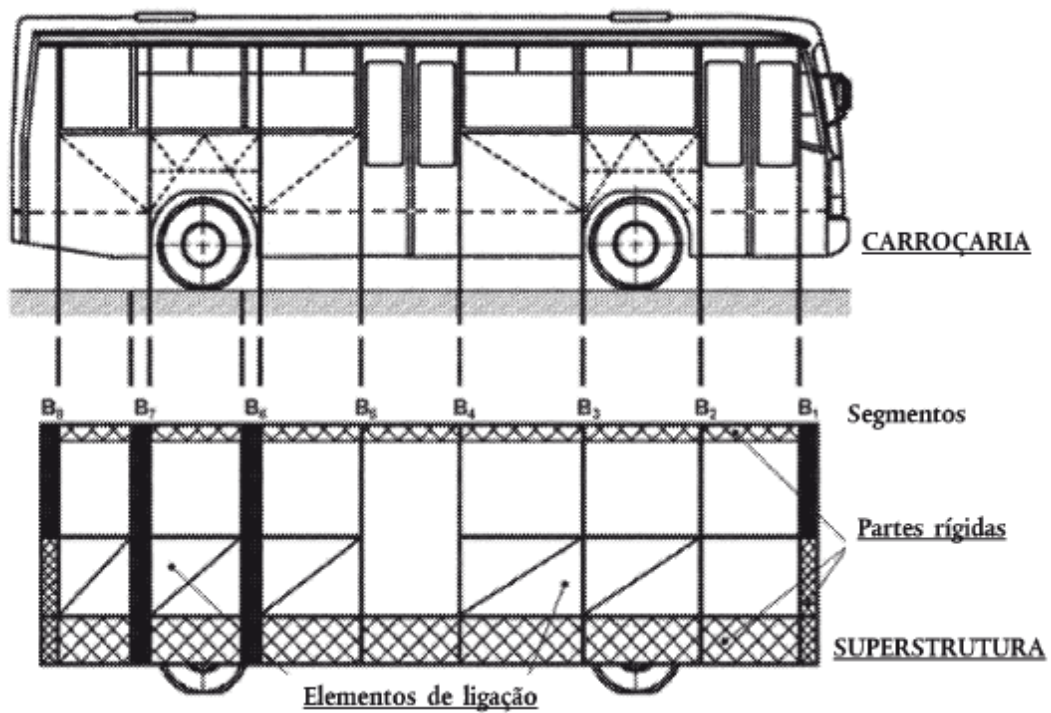


Figura 10 – Definição da superestrutura a partir da carroçaria [2]

### 2.3.3 Espaço residual

Por definição do Regulamento 66 o espaço residual “designa um espaço a preservar no(s) compartimento(s) para os passageiros, a tripulação e o condutor para aumentar a possibilidade de sobrevivência dos passageiros, do condutor e da tripulação em caso de capotagem.”[2]. Após e durante o ensaio de capotamento a superestrutura tem de garantir que o espaço residual não seja invadido.

Na Figura 11 podemos observar a especificação dimensional do espaço residual.

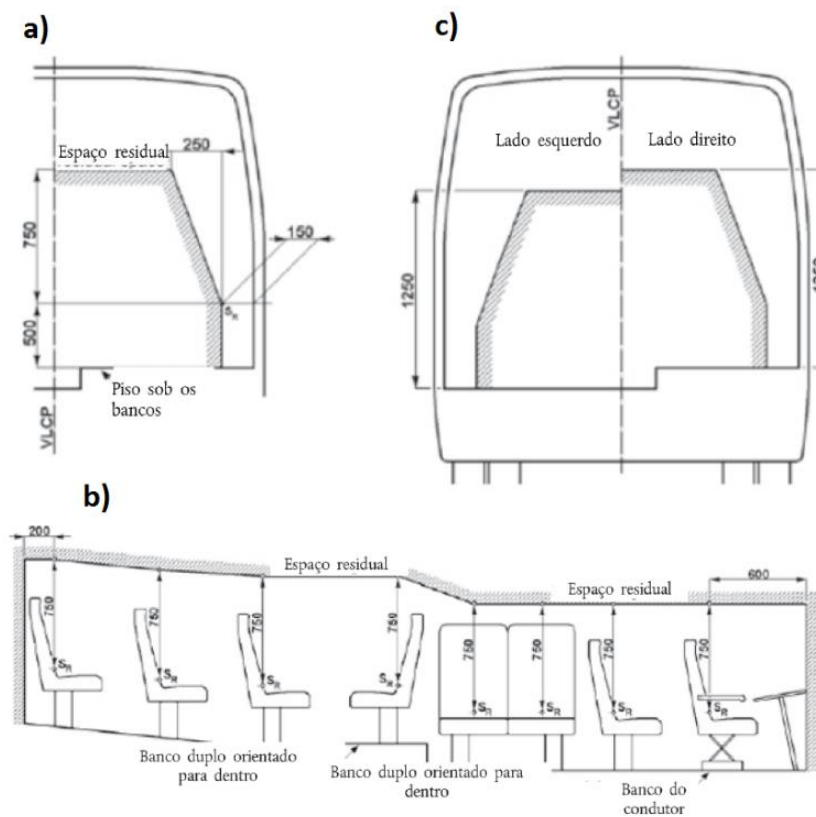


Figura 11 –Especificação de Espaço residual, a) e c) Disposição lateral [2]

### 2.3.4 Especificação do ensaio de capotagem

Tendo em conta o Regulamento 66 o ensaio é tratado por submeter a superestrutura ou parte dela a um ensaio de capotamento com objetivo de verificar se a energia provocada pelo impacto é dissipada de modo a não provocar deformações na estrutura que sejam invasivas no espaço residual. Tendo em conta o ponto do regulamento “O veículo completo é colocado na plataforma basculante, com a suspensão bloqueada, e é inclinado lentamente até atingir uma posição de equilíbrio instável. O ensaio de capotagem tem início nessa posição instável do veículo, com uma velocidade angular nula, passando o eixo de rotação pelos pontos de contacto das rodas com o solo. O veículo inclina-se até cair numa vala com uma profundidade nominal de 800 mm e um pavimento de betão cuja superfície é horizontal, seca e plana”.

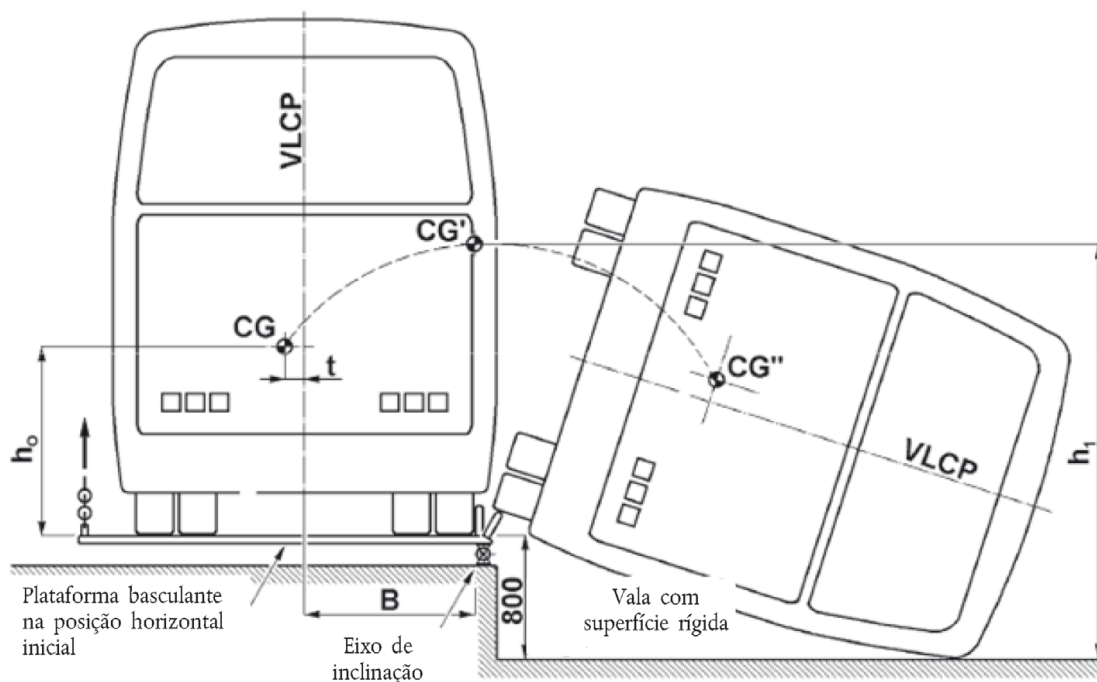


Figura 12 –Representação do ensaio de capotamento com um veículo completo [2]

Para que regulamento seja cumprido existem vários métodos de ensaios equivalentes em alternativa ao ensaio de capotamento de um veículo completo, pois ensaiar um veículo desse modo implica custos elevadíssimos para a entidade que solicita este tipo de validação. Em alternativa temos o ensaio de capotamento com secções da carroçaria em representação do veículo completo, o ensaio quasi-estático de secções da carroçaria e a simulação quasi-estática ou dinâmica através de um software por elementos finitos, sendo esta última por vezes a mais utilizada tendo em conta os baixos custos associados.

## 2.4 Perfil de alumínio obtido por extrusão

### 2.4.1 Alumínio

Num passado relativamente recente, no início do século XIX foi descoberto o alumínio. Na história do alumínio são referenciados vários nomes no que toca à sua descoberta. Embora ainda não descoberto, mas em vias de o ser, em 1808 o químico inglês Humphey Davy propôs uma alteração da sua designação de alumium para aluminum apenas por questões de terminação. Atualmente julga-se que o físico dinamarquês Hans Christian Oersted em 1827 foi o primeiro a obter o alumínio.

O alumínio depois do ferro é o metal mais utilizado em todo mundo. Este é terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre. As propriedades deste metal são: baixa densidade, a elevada resistência, a excelente resistência à corrosão, a boa maquinabilidade e alta condutividade térmica e elétrica.

Em termos de sustentabilidade o alumínio é um metal totalmente reciclável.

Para reciclar este metal requer apenas cinco por cento da energia dispensada em extração do minério. O alumínio pode ser reciclado sem grandes perdas de material e de qualidade. Estima-se que 75% do alumínio produzido ainda esteja em utilização.

O alumínio é um material que tem uma longa vida, tem uma densidade aproximadamente de um terço da do aço. As ligas tem uma resistência à tração que variam entre os 70 e os 500 MPa, as mais utilizadas rondam os 200 MPa.

Quanto à relação da tensão com a deformação, o alumínio comparativamente ao aço apresenta uma curva de comportamento diferente como pode ser observado na figura 13.

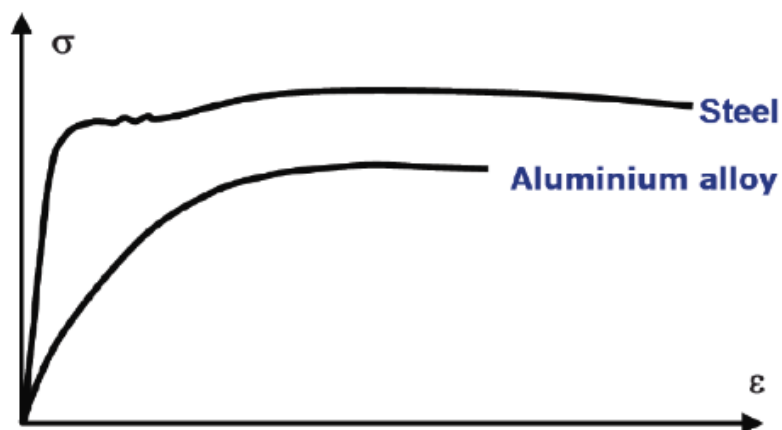


Figura 13 –Gráfico de comparação entre aço e alumínio da tensão vs deformação [8]

Nas tabela 1 e 2 são apresentados os valores das propriedades mecânicas para as principais ligas de alumínio, sendo  $t$ , a espessura,  $f_0$  a tensão de cedência e  $f_u$  a tensão de rotura.

Tabela 1 – Características das ligas de alumínio para perfis extrudidos [11]

Liga	Têmpera	$t$ [mm]	$f_0$	$f_u$
5083	O/H111	$t \leq 200$	110	270
5083	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280
5083	H14/24/34	$t \leq 5$	235	300
6060	T5	$t \leq 5$	120	160
6060	T5	$5 < t \leq 25$	100	140
6060	T6	$t \leq 15$	140	170
6060	T6	$t \leq 20$	160	215
6060	T64	$t \leq 15$	120	180
6060	T66	$t \leq 3$	160	215
6060	T66	$3 < t \leq 25$	150	195
6061	T4	$t \leq 25$	110	180
6061	T6	$t \leq 20$	240	260
6063	T5	$t \leq 3$	130	175
6063	T5	$3 < t \leq 25$	110	160
6063	T6	$t \leq 20$	160	195
6063	T6	$t \leq 20$	190	220
6063	T66	$t \leq 10$	200	245
6063	T66	$10 < t \leq 25$	180	225
6063	T66	$t \leq 20$	195	230
6005A	T6	$t \leq 5$	225	270
6005A	T6	$5 < t \leq 10$	215	260
6005A	T6	$10 < t \leq 25$	200	250
6005A	T6	$t \leq 5$	215	255
6005A	T6	$5 < t \leq 10$	200	250
6106	T6	$t \leq 10$	200	250
6082	T4	$t \leq 25$	110	205
6082	T5	$t \leq 5$	230	270
6082	T6	$t \leq 5$	250	290
6082	T6	$5 < t \leq 15$	260	310
6082	T6	$t \leq 20$	250	295
6082	T6	$20 < t \leq 150$	260	310
6082	T6	$t \leq 5$	255	310
6082	T6	$5 < t \leq 20$	240	310
7020	T6	$t \leq 15$	290	350
7020	T6	$15 < t \leq 40$	275	350
7020	T6	$t \leq 20$	280	350

Tabela 2 – Características das ligas de alumínio para chapas [11]

Liga	Têmpera	$t[mm]$	$f_0$	$f_u$
3004	H14 H24/H34	$\leq 6 3$	180 170	220
3004	H16 H26 /H36	$\leq 4 3$	200 190	240
3005	H14 H24	$\leq 6 3$	150 130	170
3005	H16 H26	$\leq 4 3$	175 160	195
3103	H14 H24	$\leq 25 12.5$	120 110	140
3103	H16 H26	$\leq 4$	145 135	160
5005	O/H111	$\leq 50$	35	100
5005	H12 H22/H32	$\leq 12.5$	95 80	125
5005	H14 H24/H34	$\leq 12.5$	120 110	145
5052	H12 H22/H32	$\leq 40$	160 130	210
5052	H14 H24/H34	$\leq 25$	180 150	230
5049	O/H111	$\leq 100$	80	190
5049	H14 H24/H34	$\leq 25$	190 160	240
5454	O/H111	$\leq 80$	85	215
5454	H14 H24/H34	$\leq 25$	220 200	270
5754	O/H111	$\leq 100$	80	190
5754	H14 H24/H34	$\leq 25$	190 160	240
5083	O/H111	$\leq 50$	125	275
5083	O/H111	$50 \leq 80$	115	270
5083	H12 H22/H32	$\leq 40$	250 215	305
5083	H14 H24/H34	$\leq 25$	280 250	340
6061	T4/T451	$\leq 12.5$	110	205
6061	T6/T651	$\leq 12.5$	240	290
6061	T651	$12.5 < t \leq 80$	240	290
6082	T4/T451	$\leq 12.5$	110	205
6082	T61/T6151	$\leq 12.5$	205	280
6082	T6151	$12.5 < t \leq 100$	200	275
6082	T6/T651	$\leq 6$	260	310
6082	T6/T651	$6 < t \leq 12.5$	255	300
6082	T651	$12.5 < t \leq 100$	240	295
7020	T6	$\leq 12.5$	280	350
7020	T651	$\leq 40$	280	350
8011A	H14 H24	$\leq 12.5$	110 100	125
8011A	H16 H26	$\leq 4$	130 120	145

### 2.4.2 Ligas de Alumínio

O Alumínio no seu estado puro é limitado principalmente pela sua resistência mecânica, sendo assim este material tem a necessidade de lhe ser adicionado elementos de liga para melhorar as suas propriedades mecânicas consoante a sua aplicação.

As ligas de alumínio são tipicamente divididas em duas categorias, as ligas para trabalho mecânico, e as ligas de fundição. Estas duas categorias são separadamente identificadas baseadas na nomenclatura utilizada pela American Aluminium Association. As ligas de trabalho mecânico são identificadas com quatro dígitos, sendo o primeiro dígito o que identifica o elemento principal, o segundo dígito identifica as alterações à liga original e os dois últimos servem para distinguir as ligas em exceção da série 1000, alumínio puro acima de 99%, neste caso os dois últimos dígitos servem para identificar o grau de pureza, por exemplo, 1050 corresponde a 99,50% de pureza. Nas ligas de fundição o primeiro dígito identifica o principal elemento de liga os dois seguintes são para distinguir as ligas dentro do mesmo tipo e o último separado por um ponto identifica a forma de obtenção, (0 se for uma peça e 1 se for um lingote). Uma modificação de uma liga original, ou dos limites de impureza para alumínio não ligado, é identificada por um código de letras posicionada antes da designação numérica. As letras são atribuídas por ordem alfabética iniciando com A mas omitindo as letras I, O, Q, e X, sendo o X reservado para ligas experimentais. [6] De seguida serão apresentadas Tabela 3 e Tabela 4 que representam os métodos de identificação estabelecidos pela *American Aluminium Association*.

Tabela 3 – Identificação das ligas de alumínio para trabalho mecânico [6]

Elemento de liga	Código da liga
Alumínio puro	Série 1XXX
Cobre	Série 2XXX
Manganês	Série 3XXX
Silício	Série 4XXX
Magnésio	Série 5XXX
Magnésio e silício	Série 6XXX
Zinco	Série 7XXX
Outros elementos	Série 8XXX

Tabela 4 – Identificação das ligas de alumínio de fundição[6]

<b>Elemento de liga</b>	<b>Código da liga</b>
Alumínio puro	Série 1XX.X
Cobre	Série 2XX.X
Silício com adição de cobre e/ou magnésio	Série 3XX.X
Silício	Série 4XX.X
Magnésio	Série 5XX.X
Zinco	Série 7XX.X
Estanho	Série 8XX.X
Outras ligas	Série 9XX.X

### 2.4.3 Tratamentos

Apenas as ligas da série 2XXX, 6XXX e 7XXX podem ser sujeitas a tratamentos térmicos. A identificação do tratamento térmico vem junto ao código da liga separado por um hífen, por exemplo, AA7022-T6. Para identificar os tipos de tratamentos são usadas as seguintes letras, o F para ligas que não levaram qualquer tipo de tratamento após a sua obtenção, a letra O para ligas que foram sujeitas a um recozimento para homogeneizar a estrutura e alívio das tensões residuais, a letra H com dois ou três dígitos seguintes, é aplicada a ligas que sofrem tratamento mecânico a frio. A letra T seguida por um ou mais dígitos, é utilizada para identificar o tratamento térmico com o objetivo de melhorar as suas propriedades, e por fim a letra W baseia-se na solubilização, uma têmpera instável aplicável somente às ligas que envelhecem espontaneamente na temperatura ambiente (envelhecimento natural) após solubilização.

Nas Tabela 5 serão apresentadas algumas designações dos tratamentos mencionados.

Tabela 5 – Identificação dos tratamentos por deformação plástica[12]

<b>Designação</b>	<b>Definição do 1º dígito</b>
H1x	Deformação a frio
H2x	Deformação a frio e recozido parcialmente
H3x	Deformação a frio e estabilização

No tratamento por deformação plástica o primeiro dígito está relacionado com o tipo de operação que o material sofre e o segundo com o grau de encruamento sendo este relacionado com a diminuição da espessura. Na Tabela 6 são apresentados alguns exemplos quanto ao nível de encruamento.

Tabela 6 – Exemplo dos tratamentos por deformação plástica [13]

Designação	Especificação
H12	1/4 duro (somente encruamento)
H14	1/2 duro (somente encruamento)
H16	3/4 duro (somente encruamento)
H18	Duro (somente encruamento)
H19	Extra-duro (somente encruamento)
H22, H24	Encruado e depois recozido parcialmente
H32, H34	Encruado e então estabilizado

Nas ligas por tratamento térmico, como dito anteriormente, servem para melhorar as suas propriedades. Quanto à sua denominação é usada a letra “T” seguido de um dígito que serve para identificar o tipo de tratamento. Eventualmente poderá ser seguido de um segundo ou mais dígitos em que estes poderão estar relacionados com a diminuição de espessura por deformação plástica.

Tabela 7 – Especificação dos tratamentos térmicos [13]

Designação	Especificação
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Recozimento
T3	Solubilização total e deformação a frio
T4	Solubilização total e envelhecimento natural
T5	Apenas envelhecimento artificial
T6	Solubilização total e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, deformação a frio e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio
T10	Envelhecido artificialmente, sem pré-tratamento e deformação a frio

#### 2.4.4 Liga Série 6XXX

As ligas da série 6000 são as mais utilizadas na extrusão e tem enumeras aplicações. Estas podem ser endurecidas por tratamento térmico de solubilização e por envelhecimento (endurecimento por precipitação). As ligas possuem grande resistência contra a corrosão. Tem uma elevada deformabilidade e são fáceis de anodizar e tem uma boa soldabilidade e maquinabilidade. A sua resistência mecânica poderá variar entre os 150 a 350 MPa. Ligas com baixo teor de silício e magnésio, como por exemplo a liga 6060, proporcionam uma grande cadência de extrusão e podem adotar secções complexas de baixa espessura. Ligas da série 6xxx dispõem uma grande aplicabilidade arquitetónica em edifícios, em transportes terrestres, aéreos e marítimos. A Tabela 8 apresenta a composição química de algumas ligas bastante usuais.

Tabela 8 – Composição química de algumas ligas [6]

Liga	Composição wt%								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros
6005	0,6-0,9	0,35	0,1	0,1	0,4-0,6	0,1	0,1	0,1	0,05
6060	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,35-0,60	0,05	0,15	0,1	0,05
6061	0,4-0,8	0,7	0,1-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15	0,05
6106	0,3-0,6	0,35	0,25	0,05-0,2	0,4-0,8	0,2	0,1		0,05

### 2.4.5 Princípios da extrusão

A extrusão é um processo mecânico de produção de perfis de forma contínua. O material cortado de lingotes, o *bilete*, é aquecido num forno de indução à temperatura ideal de extrusão, de 450 a 500 °C. O alumínio aquecido é forçado a escoar por uma matriz com a forma do perfil desejado, adquirindo deste modo perfis de secção constante.



Figura 14 –Matriz de extrusão [14].



Figura 15 – Biletas [16].

O perfil é obtido a uma velocidade de 5 a 50 metros por minuto em comprimentos de 25 a 45 metros. O perfil é arrefecido a ar ou água à medida que vai sendo extrudido da matriz. Após o arrefecimento o perfil é esticado para alívio de tensões e para retificação de algumas deformações não desejadas provocadas pela ação da extrusão.

Após estas operações o perfil é cortado à medida pretendida pelo cliente. O tratamento térmico é controlado por envelhecimento natural ou artificial sendo este o que confere a resistência final do material [7].

As matrizes são de aço especial para ferramentas e são caracterizadas por duas classes principais, para perfis sólidos e para perfis tubulares. As matrizes para perfis sólidos são produzidas com um molde achatado em forma de disco enquanto as matrizes para perfis tubulares são compostas por duas partes, uma que tem um mandril para dar a forma interior e outra para dar a forma exterior.

## 2.5 Ligações aparafusadas

Uma ligação aparafusada é caracterizada pela união de duas ou mais peças através de um parafuso. O objetivo deste tipo de ligações é garantir a junção dos elementos atendendo à possibilidade de desmontagem. Tipicamente o parafuso quando aplicado corretamente encontra-se à tração, não devendo estar solicitado ao corte.

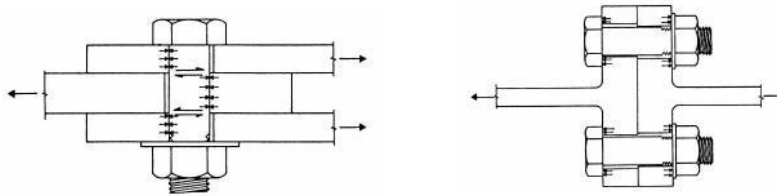


Figura 16 – Solicitações em juntas aparafusadas [17].

A resistência dos parafusos depende da resistência do material que é fabricado. Para o dimensionamento das ligações aparafusadas tem de haver em consideração as condições fronteiras onde ele está localizado, como os esforços externos e o estado entre superfícies. Após a seleção do parafuso e o respetivo binário de aperto o parafuso quando apertado fica submetido à tração e os elementos a ligar ficam submetidos ao esmagamento. Estes fenómenos são espectáveis ocorrerem dentro do regime elástico garantindo deste modo a rigidez da ligação. Na generalidade os elementos integrantes de uma junta comportam-se como corpos elásticos e localmente plásticos. A tensão introduzida ao parafuso durante o aperto resulta numa força de fecho de uma junta sendo esta designada como pré-carga.

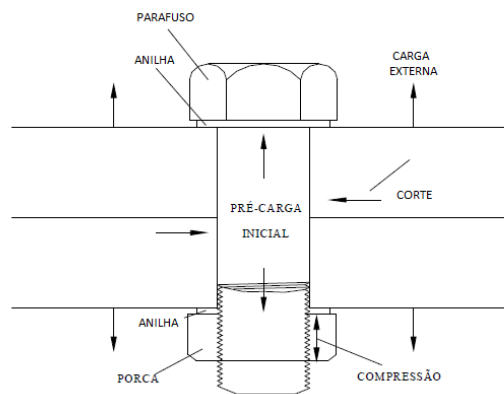


Figura 17 – Representação das forças de uma junta com parafuso anilha e fêmea.

O cálculo da pré-carga é fundamental pois em caso de excesso o parafuso ou elementos constituintes da junta poderão ser danificados por deformações plásticas. No caso de uma baixa pré-carga aplicada poderá ocorrer desaparafusamento.

As juntas aparafusadas em condições de serviço encontram-se sujeitas a vários tipos de solicitações como flexão, tração, corte, cíclicas (fadiga) e a combinação de elas todas o que dificulta a previsão da pré-carga do parafuso.

O binário de aperto aplicado no parafuso poderá geralmente fornecer uma medida indireta de controlo à pré-carga do parafuso. A fórmula seguinte apresenta, de uma

forma mais simplificada, a relação entre o binário de aperto com a pré-carga obtida no parafuso.

$$T=K.D.P \quad (1.1)$$

Onde,  $T$  é o binário de aperto aplicado,  $D$  é o diâmetro nominal do parafuso,  $P$  é a pré-carga obtida e  $K$  é coeficiente de torque aplicado em função do tipo de parafuso, estados das superfícies das interfaces, lubrificantes etc

Segundo *Yanyao Jiang* [18], o binário necessário para apertar um parafuso é definido tendo em consideração o binário suficiente para tensionar o parafuso, o necessário para vencer o atrito da rosca do parafuso e o atrito entre a face da fêmea e a superfície de apoio. A seguinte fórmula permite calcular matematicamente tendo em conta todos estes fatores considerados.

$$T = P \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1.2).$$

Onde  $T$  é o binário aplicado ao parafuso,  $P$  é a pré-carga obtida,  $p$  é o passo da rosca,  $\mu_t$  é o coeficiente de atrito entre as roscas da fêmea e do parafuso,  $r_t$  é o raio de contacto efetivo das roscas,  $\beta$  é o semi-ângulo das roscas,  $\mu_n$  é o coeficiente de atrito entre a face da fêmea e sua superfície de apoio e  $r_n$  é o raio efetivo da área de contato entre a fêmea e superfície de apoio.

Segundo a equação 1.2 o primeiro termo  $\frac{Pp}{2\pi}$  representa o binário necessário para tensionar o parafuso. O segundo termo  $\frac{P\mu_t r_t}{\cos \beta}$  é o binário dissipado para vencer o atrito entre as roscas do parafuso e a fêmea e o último termo  $P\mu_n r_n$  é o binário necessário para vencer o atrito entre a face da fêmea e a superfície de apoio. Na tabela seguinte são apresentados valores experimentais do coeficiente de atrito da rosca e da superfície de apoio da cabeça do parafuso. [21]

Tabela 9 – Valores de coeficientes de atrito experimentais da rosca ( $\mu_t$ ) e da cabeça do parafuso ( $\mu_n$ ) [21]

Table 16 Mean value and standard deviation (in parentheses) of  $\mu_s$   $\mu_w$  (n=30)

coating	friction coefficient of material	friction coefficient of thread surface $\mu_s$		friction coefficient of bearing surface $\mu_w$
		FCD70	S50C	
no coating	filmmaking heat treated	01281 (00248)	01541 (00194)	01212 (00070)
	zinc plated	01233 (00190)	02384 (00633)	01037 (00185)
$\mu$ -stabilizer I	filmmaking heat treated	01369 (00176)	01237 (00120)	00591 (00166)
	zinc plated	01106 (00187)	01133 (00129)	00898 (00191)
$\mu$ -stabilizer II	filmmaking heat treated	01398 (00306)	01254 (00266)	00520 (00193)
	zinc plated	00985 (00090)	01009 (00088)	00598 (00122)

# 3

## TECNOLOGIA CO-BOLT®

**3.1** Tipologia da estrutura

**3.2** Elementos constituintes da estrutura



### 3.1 Tipologia da estrutura

A tecnologia CO-BOLT® permite a montagem de uma estrutura simplesmente aparafusada sem ter necessidade de utilizar processos de soldadura. O sistema é formado por perfis de alumínio extrudado com canais especiais em forma de “C” conectados com acessórios do tipo esquadro (cantos) e elementos de aparafusar (parafuso e fêmeas M8). Com este desenho de perfil a fêmea pode correr na calha assumindo uma qualquer posição havendo a possibilidade de fazer ajustes em relação a um plano. Os parafusos são fornecidos com um adesivo próprios para roscas, que ajuda a sua fixação prevenindo o desaparafusamento não intencional devido a vibrações.

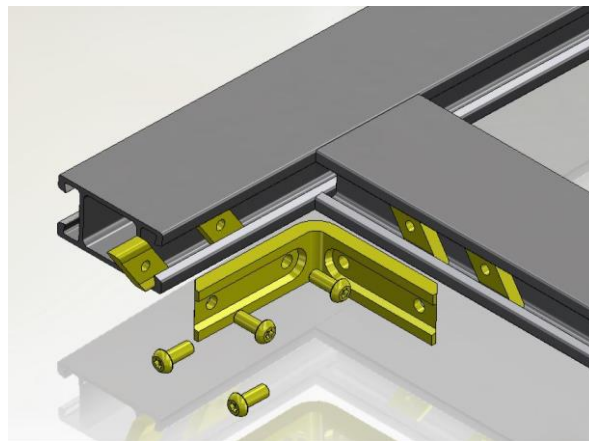


Figura 18 – Representação de uma ligação

A estrutura é composta por dois tipos de perfis principais, o perfil da armação do tejadilho e o perfil do painel lateral. Eles estão conectados por vários perfis de menor dimensão que correspondem às travessas e aos pilares.

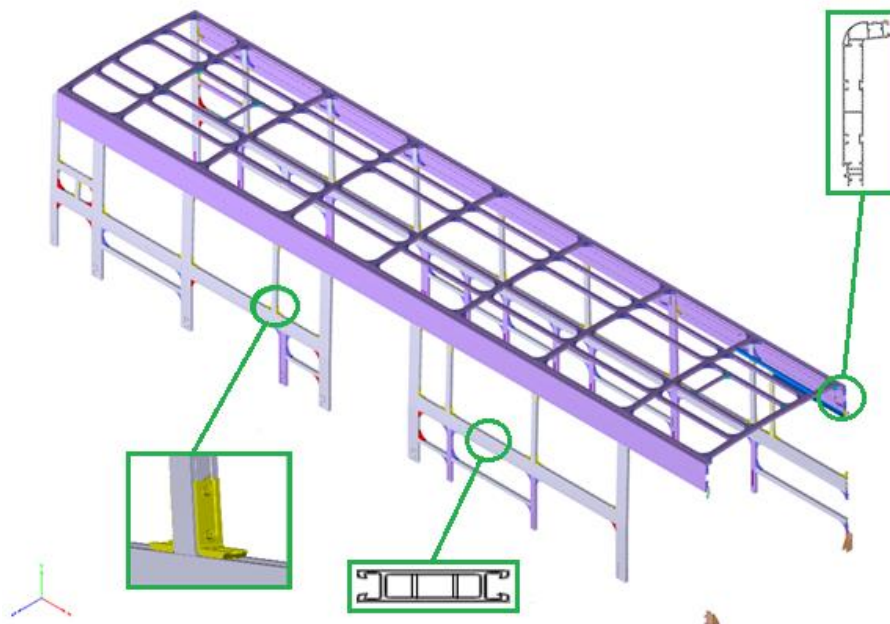


Figura 19 – Representação da estrutura completa de um autocarro

A estrutura com a tecnologia Co-Bolt, em comparação à típica estrutura de aço utilizada neste setor, é mais vantajosa principalmente nos seguintes aspectos, o controlo dimensional e menor utilização de recursos nas operações de montagem.

Todos os perfis localizados em zonas mais propícias a colisões são facilmente substituíveis.

### 3.2 Elementos constituintes da estrutura

A tipologia da estrutura, tanto a nível da arquitetura como da geometria dos perfis, foi desenvolvida e patenteada pela empresa *HESS*. Os perfis em alumínio apresentados são obtidos por extrusão e os cantos por fundição injetada, ambos tem uma geometria complexa.

Tabela 10 – Identificação da secção dos perfis extrudidos

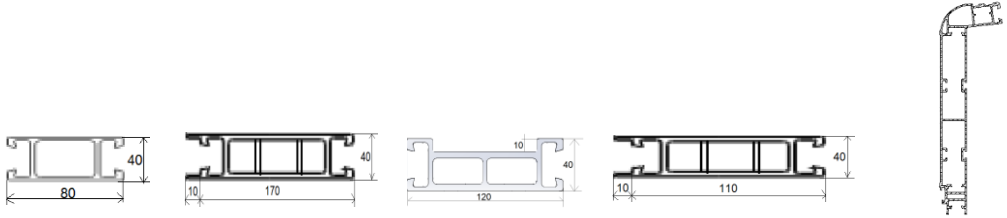
Material	Material: EN AW-6005A T6 Espessura: 3mm		Alumínio – EN AW – 6106 T6
Geometria			

Tabela 11 – Identificação dos acessórios de ligação dos perfis

Material	Peça de fundição Al 6082 T6	Peça de fundição Al 6082 T6	Parafuso Aço M8 8.8	Fêmea Al 6060 T6
Geometria				

Nas tabelas seguintes serão apresentadas as propriedades dos materiais a considerar na estrutura.

Tabela 12 – Propriedades dos perfis extrudidos [7]

<b>Propriedade</b>	<b>EN AW-6005A T6</b>	<b>EN AW-6060 T6</b>	<b>EN AW - 6106 T6</b>
Módulo de elasticidade (GPa)	69,5	69,5	69,5
Coefficiente de Poisson	0,33	0,33	0,33
Tensão de cedência (MPa)	225	140	200
Tensão de rotura (MPa)	270	170	250
Alongamento (%min.)	8	8	8

Tabela 13 – Propriedades das peças de fundição

<b>Propriedade</b>	<b>EN AW-6082 T6</b>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2710
Módulo de elasticidade (GPa)	69,5
Coefficiente de Poisson	0,33
Tensão de cedência (MPa)	260
Tensão de rotura (MPa)	310
Alongamento (%min.)	10



# 4

## ENSAIO DA LIGAÇÃO DO PERFIL

### **4.1 Introdução ao ensaio**

### **4.2 Desenvolvimento de um dispositivo de apoio ao ensaio**

#### 4.2.1 Desenvolvimento do dispositivo

### **4.3 Ensaio preliminar**

### **4.4 Ensaios das ligações**

#### 4.4.1 Ensaio do provete 1, perfil da janela com momento positivo

#### 4.4.2 Ensaio do provete 2, perfil da janela com momento negativo

#### 4.4.3 Ensaio ao provete 3, perfil do tejadilho

#### 4.4.4 Ensaio ao provete 4, perfil do tejadilho

### **4.5 Resultados**

#### 4.5.1 Curva característica da ligação dos perfis de janela

#### 4.5.2 Curva característica da ligação dos perfis de tejadilho



#### 4.1 Introdução ao ensaio

Os ensaios foram realizados com base em algumas considerações do Anexo 8 Regulamento 66. Este permite a verificação numérica/experimental deste tipo de estruturas de veículos pesados de passageiros aplicando, conforme descrito no anexo 8 o método das rótulas plásticas. Para aplicação deste método é necessário determinar o comportamento das ligações entre perfis. Este comportamento deve ser verificado num ensaio com a apresentação dos resultados através de um gráfico com relação do momento flector ( $M$ ) e o ângulo de rotação ( $\varphi$ ) entre os perfis que convergem para o mesmo nó. [2]

A Figura 20 representa um diagrama geral característico das rótulas plásticas (PH). [2].

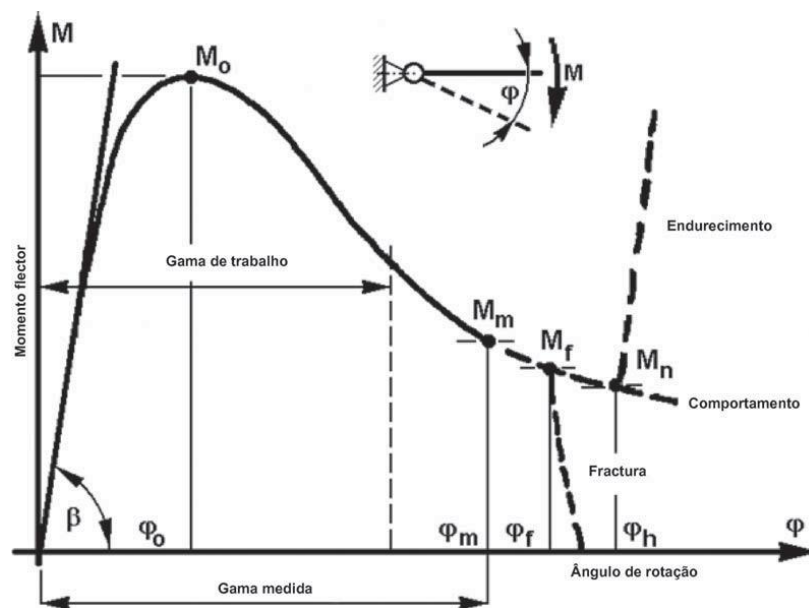


Figura 20 – Diagrama característico de uma rótula plástica [2]

Assim sendo os objetivos deste capítulo são identificar as rótulas plásticas, verificar o seu comportamento (ângulo girado em função do momento aplicado) e também a verificação do modo de deformação dos elementos.

Tendo em consideração o desenho das ligações entre perfis é razoável admitir que as rótulas plásticas estão localizadas nas ligações aparafusadas. Porém, em virtude do desenho da secção transversal de alguns perfis é necessário a verificação experimental se não se formarão noutra local que não as uniões aparafusadas, uma vez que existem variações abruptas de secção resistente.

Sendo que a natureza das ligações entres os diferentes perfis que constituem a superestrutura é complexa, como já referido conta com ligações aparafusadas, cantos de ligação de diferentes desenhos e materiais, a simulação que se pretende fazer é descrita no capítulo 6 e deve ser validada com ensaios experimentais.

Para determinar experimentalmente o comportamento das diferentes ligações entre perfis no sistema *Co-Bolt* o autor realizou um plano de ensaios experimentais a algumas destas ligações.

Na Figura 21 está representado a porção da superestrutura que foi ensaiada em representação do nó assinalado na Figura 22. No seguimento deste capítulo os prumos serão identificados como “Perfil A” e o elemento do tejadilho será como “Perfil B”. Este nó foi escolhido para o ensaio pelo autor ter entendido ser o mais representativo da superestrutura estando ele integrado num arco completo.

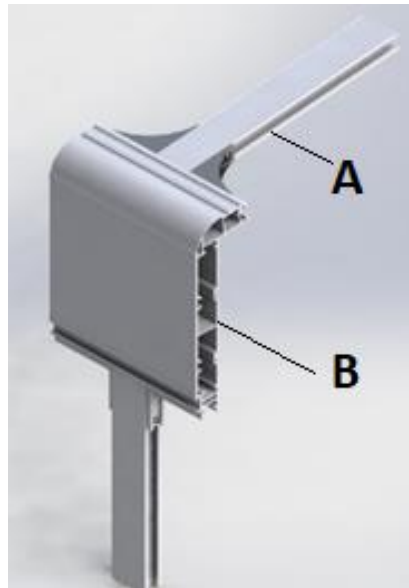


Figura 21 – Porção da superestrutura

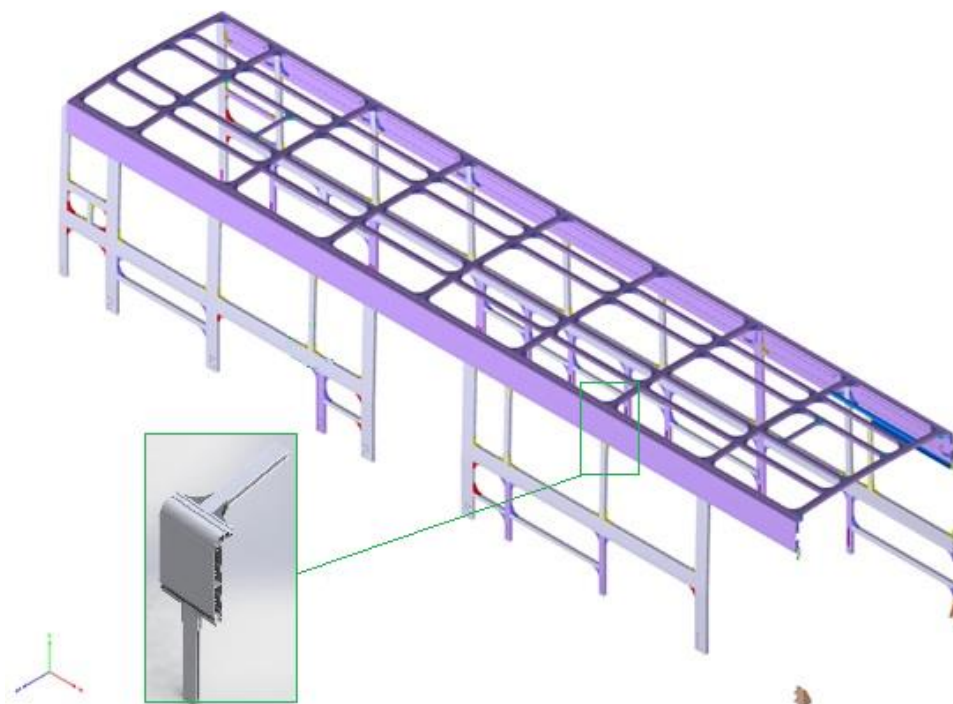


Figura 22 – Localização a porção da estrutura ensaiada

## 4.2 Desenvolvimento de um dispositivo de apoio ao ensaio

Para determinar o comportamento das uniões entre perfis como já referido o autor optou por realizar um conjunto de ensaios. Estes têm por finalidade também validar a simulação numérica.

Para dar cumprimento ao R66 é necessário determinar a curva de comportamento da ligação momento resistente vs ângulo de rotação relativa entre os dois perfis. Isto tem por pressuposto que a união entre perfis é o ponto mais fraco da estrutura.

Para a realização do ensaio deve ser aplicado um momento à união e medir a rotação relativa entre os perfis. A aplicação de um momento puro a esta união não é possível sem a construção de uma máquina adequada para o efeito. Como no âmbito desta tese o autor não dispunha do tempo e dos meios necessários para a projetar e construir uma máquina de raiz adequada aos ensaios, optou pela adaptação de uma máquina de tração existente no ISEP.

A adaptação da máquina de tração para fazer ensaios de momento vs rotação tomou um tempo relevante na execução deste trabalho. Para o efeito foi criado um dispositivo para fixar o provete a ensaiar e simultaneamente transformar a força de tração da máquina em momento fletor como descrito neste capítulo.

Na Figura 23 está representado o modo de aplicação do momento fletor.

Os ensaios foram efetuados na máquina *Shimadzu AG-X 100kN*, ver Figura 24, na qual foi adaptado o dispositivo descrito neste subcapítulo.

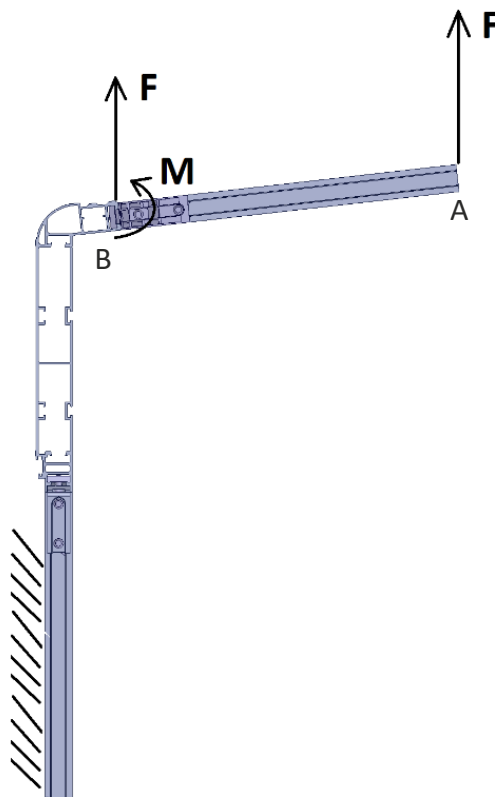


Figura 23 – Porção da estrutura ensaiada

Como podemos verificar na Figura 23 a aplicação de uma força na extremidade do perfil no ponto “A” resulta num momento na ligação entre os perfis, ponto “B”. Idealmente a aplicação do momento não devia utilizar o recurso de um braço, mas sim a aplicação momento direto na ligação. Quanto maior for o braço para gerar o momento fletor menor será o esforço de corte na ligação, para esta solução são desejáveis braços tão longos quanto possível.

Por razões de avanço foram utilizados perfis com o comprimento de 500 mm, nestas condições para uma força 1000 N o momento na ligação foi de 500 N.m e o esforço cortante de 1000 N.

O momento aplicado na ligação será calculado em função dos valores da força registados pela máquina. O esforço de corte nesta abordagem foi desprezado.

O ensaio foi elaborado no laboratório do ISEP com a máquina de ensaio *Shimadzu AG-X 100 kN* presente na Figura 24. O ensaio será executado com uma velocidade de deslocamento de 50mm/min. O dispositivo de apoio ao ensaio será fixo na base da amarra inferior e a aplicação do deslocamento será através da amarra superior. Este dispositivo deve garantir uma rigidez suficiente e um mecanismo de transmissão do deslocamento fiável de modo a não influenciar os resultados recolhidos pelo equipamento.



Figura 24 - Máquina de ensaio *Shimadzu AG-X 100 kN*

#### 4.2.1 Desenvolvimento do dispositivo

Numa primeira abordagem foi esboçado o dispositivo representado na Figura 25. Este dispositivo foi contruído em chapa de aço com 4mm de espessura e contempla o elemento principal e o mais robusto em formato de “caixa”, dois suportes de apoio, dois prumos e um rolete. Este dispositivo foi desenvolvido para a fixação da ligação através de parafusos M10 em duas posições de modo que seja possível ensaiar o provete da ligação da janela e do tejadilho no mesmo dispositivo.

Os dois prumos verticais e o rolete servem de guia para aplicação da força através de uma fita metálica ligada à amarra superior da máquina de ensaio. Estes elementos tem a função de guiar a fita de modo a garantir a coaxialidade com a amarra.

Na Figura 25 e Figura 26 podemos verificar o sentido da força aplicada e a versatilidade do dispositivo quanto à fixação dos provetes a ensaiar.

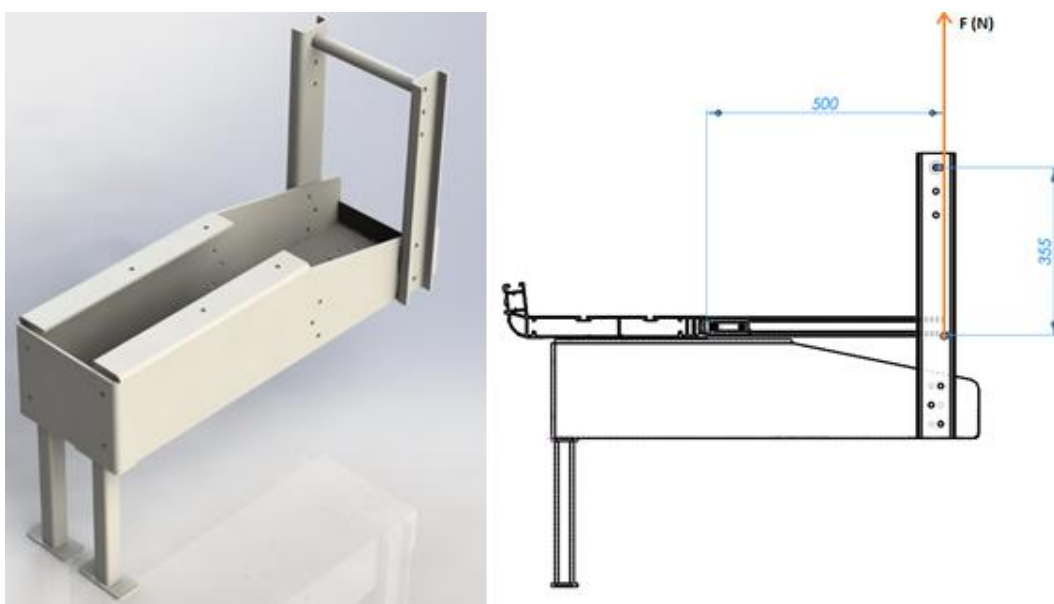


Figura 25 – Primeiro conceito do dispositivo de apoio ao ensaio

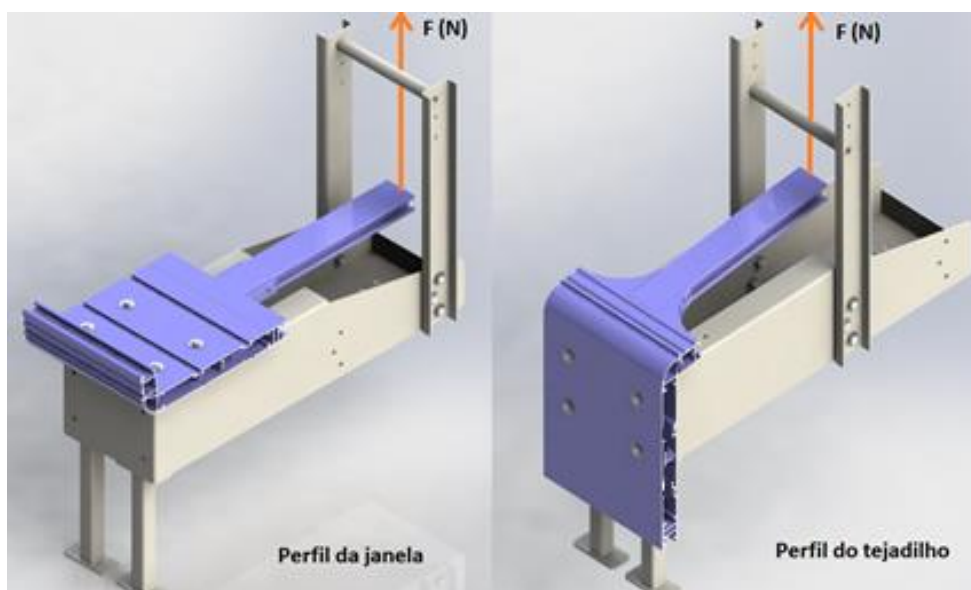


Figura 26 – Representação do modo de aplicação da força na ligação

Após o fabrico do dispositivo, foi efetuada uma montagem de teste com o objetivo de verificar a fiabilidade das ligações entre todos os elementos envolventes, o provete para ensaio, dispositivo de apoio e a máquina de ensaio.

Rapidamente concluiu-se que não seriam necessários os dois suportes do dispositivo, ficando este apenas apoiado e fixo por parafusos na base da máquina Shimadzu, ver Figura 27.



Figura 27 – Montagem do primeiro conceito do suporte.

Depois de analisar todos os pormenores de projeto em detalhe e com o dispositivo já montado na máquina, concluiu-se que o mecanismo de guia da fita não forneceria grande confiança quanto à sua estabilidade e além disso não garantia a constante perpendicularidade entre a força exercida pela fita e o braço.

O projeto do dispositivo de ensaio foi reavaliado e redesenhado. Num novo desenho optou-se por substituir a guia por um acessório que mantivesse o braço contante e a força sempre perpendicular a este conforme a Figura 28.

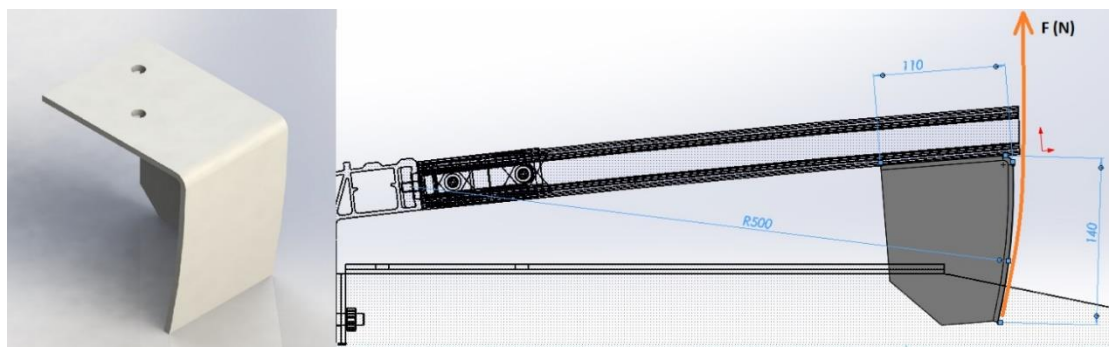


Figura 28 – Suporte de ligação da fita ao perfil.

Esta ligação foi desenhada tendo em consideração o comprimento do braço e centro onde em princípio haverá rotação. Com este conceito de ligação permite que a força seja tangente à superfície curvada e deste modo é conseguida garantia que o momento aplicado seja constante. Na Figura 29 podemos verificar a fase de adaptação do dispositivo no perfil de alumínio.



Figura 29 – Execução da alteração do mecanismo de guia

Na Figura 30 podemos verificar a fase de montagem do dispositivo de ensaio com o respetivo provete. A perspetiva da figura permite observar o tipo de amarração do dispositivo à máquina de ensaios assim como os acessórios para aplicação do deslocamento na ponta do perfil (fita e guia).



Figura 30 – Verificação do binário de aperto nas ligações

Na Figura 31 podemos observar a montagem finalizada para dar início ao ensaio. De seguida será apresentado um ensaio preliminar que tem como principal objetivo por à prova as condições que foram criadas para a execução do ensaio e também a verificação do comportamento da estrutura em função do pressuposto anteriormente.

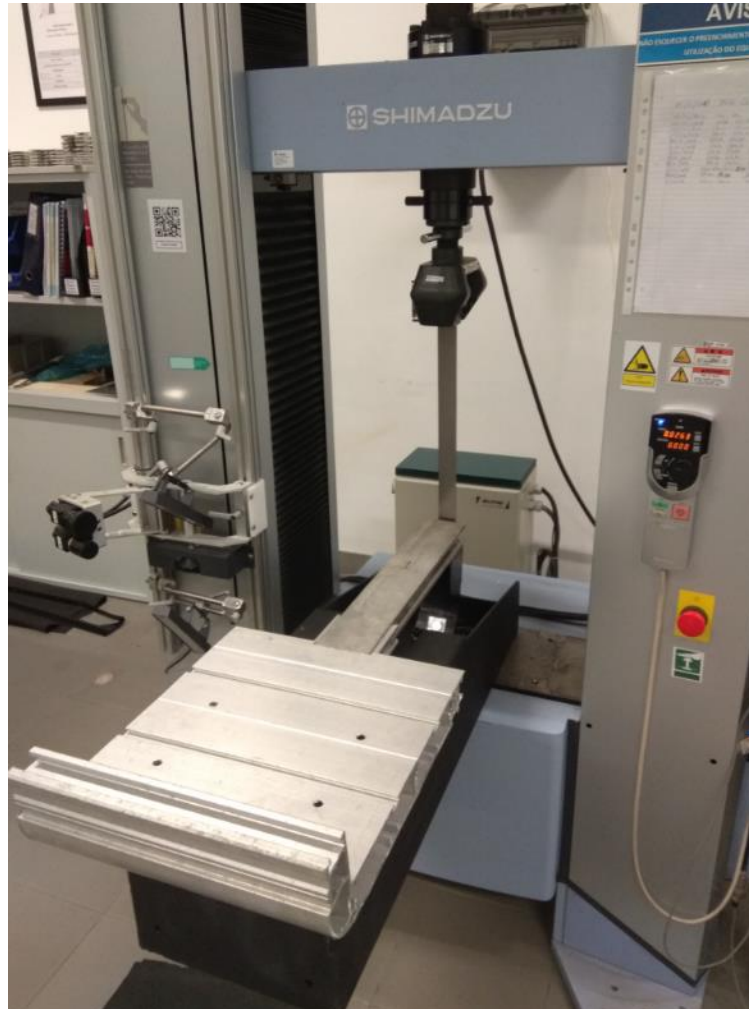


Figura 31 -Montagem geral da banca de ensaio

### 4.3 Ensaio preliminar

Devida a geometria complexa da secção transversal do perfil B (Sanca), e o desconhecimento de qual será o seu comportamento em ensaio, foi realizado um ensaio preliminar para colher alguns dados e verificar o seu comportamento global.

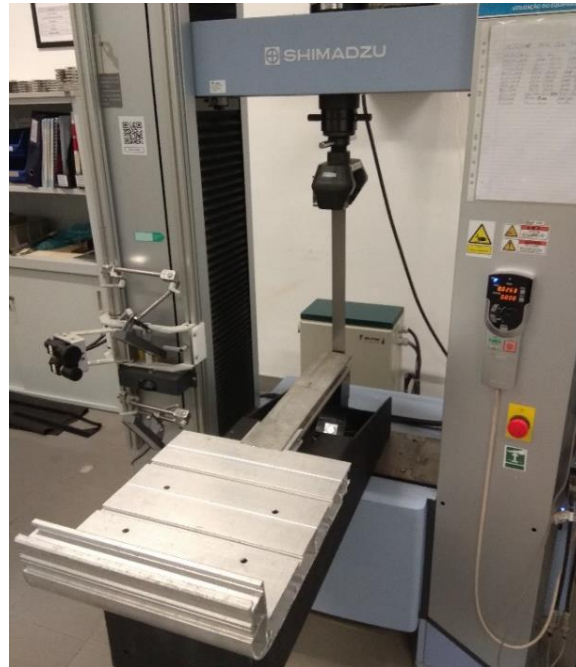


Figura 32 – Montagem para ensaio preliminar

Como podemos verificar na Figura 33 o ponto de rotação, ou secção de menor resistência, não se verificou na ligação aparafusada mas sim no perfil B, mais concretamente junto à calha de fixação de acessórios, na Figura 33.

É verificado que não existe qualquer rotação relativa entre o perfil A e o perfil B e conseqüentemente a ligação aparafusada não sofreu qualquer tipo de deformação permanente visível.

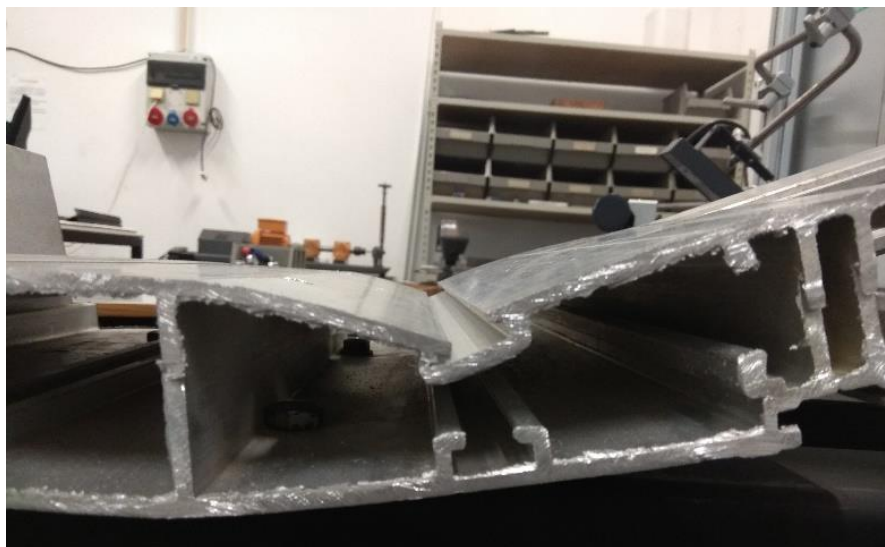


Figura 33 – Momento quando a estrutura entra em instabilidade 1º ensaio

Neste ensaio verificou-se que o perfil B (sanca) deformou-se plasticamente numa zona de descontinuidade, zona onde possui uma calha para aplicação de fêmeas. A deformação verificada foi ao longo de todo o perfil B, assim sendo o comprimento do perfil B terá uma influência importante no comportamento da ligação, isto é comprimentos maiores do perfil B poderão fazer resistir mais na zona da calha e levar a que a rótula plástica se forme entre os dois perfis (na ligação aparafusada).

Para ensaios futuros fica um aspeto a considerar, pois é um aspeto de relevo a resistência mecânica do perfil B em função do comprimento a ensaiar. Em futuros ensaios é fundamental que o provete a ensaiar tenha um perfil B de comprimento igual à distância entre dois montantes de janela.

Na Figura 34 podemos verificar a curva de comportamento da ligação do ensaio preliminar que apresenta os valores do momento aplicado na rótula em função do ângulo de rotação. Como se pode observar o seu comportamento não é linear, verificou-se um momento máximo de 900 N.m com uma queda abrupta no momento da deformação plástica junto à calha de fixação de acessórios.

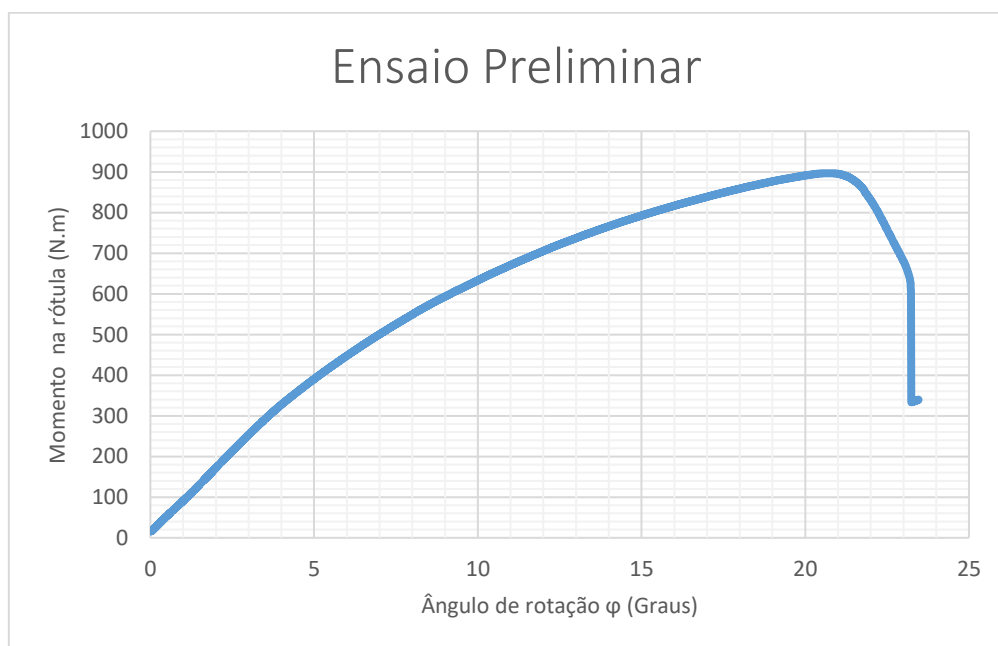


Figura 34 – Curvas Momento-Angulo de rotação do ensaio preliminar

Com este ensaio preliminar podemos concluir que a rótula plástica não se encontra na ligação aparafusada, mas sim no perfil tipo B, pelo menos para este comprimento de perfil. A formação da rótula plástica no perfil B vai contra o pressuposto inicial, considerando que a deformação plástica ocorreria na ligação entre dois perfis. Assim sendo, o suporte foi ajustado de forma a fixar o perfil B junto à zona da ligação aparafusada, de modo a impor a rotação exclusivamente nessa zona. No entanto, é de salientar que durante o ensaio de capotamento de uma superestrutura construída com estes perfis pode-se verificar a formação de uma rótula plástica no perfil B, pelo que em trabalhos futuros será muito importante estudar essa situação.

#### 4.4 Ensaio das ligações

O estudo terá seguimento na avaliação da resistência mecânica das ligações aparafusadas. As ligações, representadas na Figura 18, são compostas por cantos fabricados em alumínio fundido, por parafusos M8 em aço e fêmeas para rasgos em desenho próprio fabricadas em alumínio, conforme a Figura 35. Os binários de aperto foram aplicados de acordo as informações do fabricante, neste caso todos os parafusos foram apertados com um binário de 21 N.m.

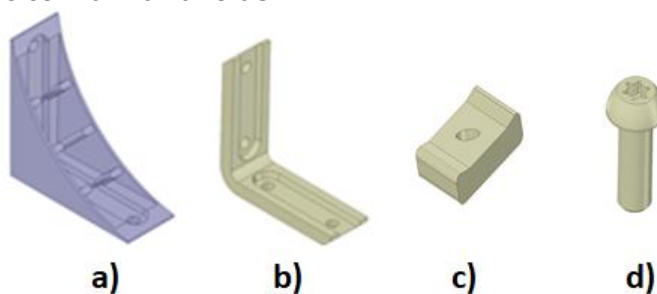


Figura 35 – a) Canto perfil tejadilho b) Canto perfil da janela c) Fêmea d) Parafuso M8

No âmbito deste trabalho foi elaborado um programa de ensaios não muito extenso, mas suficientemente abrangente para determinar a curva de comportamento das ligações com diferentes geometrias e em diferentes direções.

Foram realizados dois ensaios na ligação entre o perfil do tejadilho e do perfil B e foram realizados outros dois ensaios entre o perfil da janela e o perfil B. A opção destas zonas a ensaiar prende-se com o facto de utilizarem cantos diferentes. Na ligação do tejadilho são usados cantos conforme a Figura 35 a) e na ligação de janela usam cantos conforme a Figura 35 b).

Fruto de um eventual acidente de capotamento a superestrutura, mais concretamente as ligações em estudo, podem sofrer momentos num sentido ou noutro. Uma vez que o perfil B é assimétrico verificou-se a necessidade de realizar ensaios com momento em ambos os sentidos, ver Figura 36.

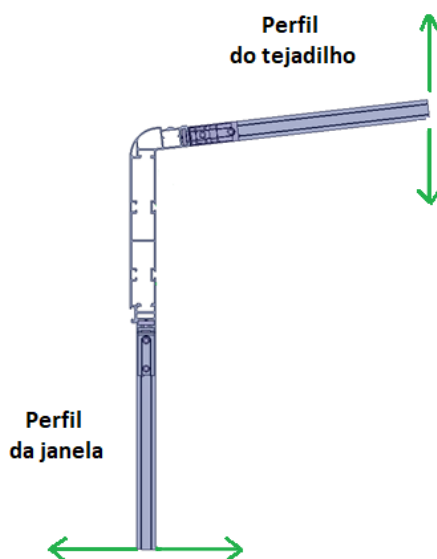


Figura 36 – Sentidos de solicitação mais comuns em situação de capotamento

Foram executados dois ensaios, com aplicação da carga no perfil da janela com sentidos opostos, em relação ao perfil do tejadilho apenas foi feito num sentido devido a limitações de montagem no dispositivo desenvolvido. ver Figura 37.

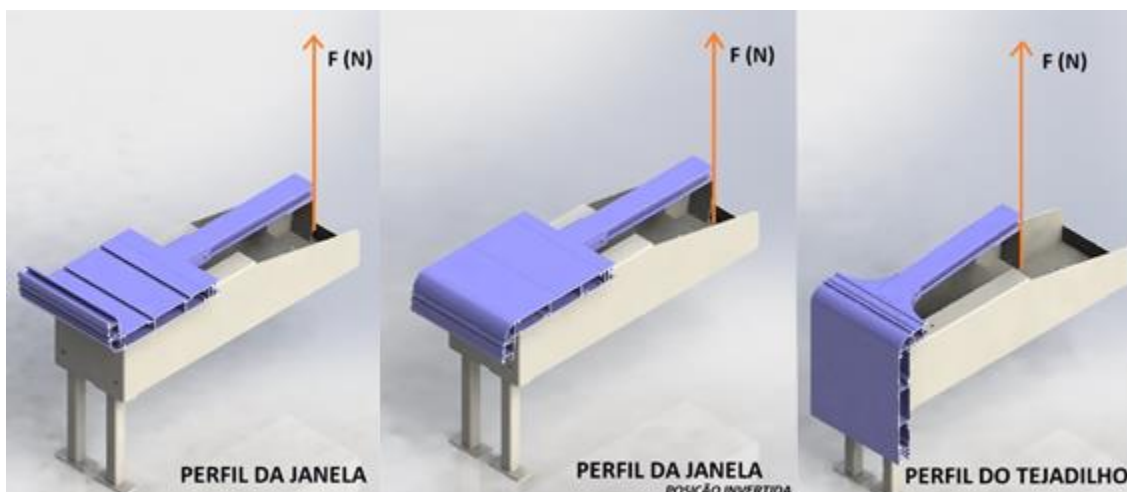


Figura 37 – Representação do modo de ensaio das ligações aparafusadas

Para impor a deformação apenas na ligação aparafusada foi necessário fazer uma alteração à fixação do provete. A decisão tomada foi aproximar a fixação aparafusada o mais possível dos cantos de ligação. A nova posição dos parafusos de fixação está assinalada na Figura 38.

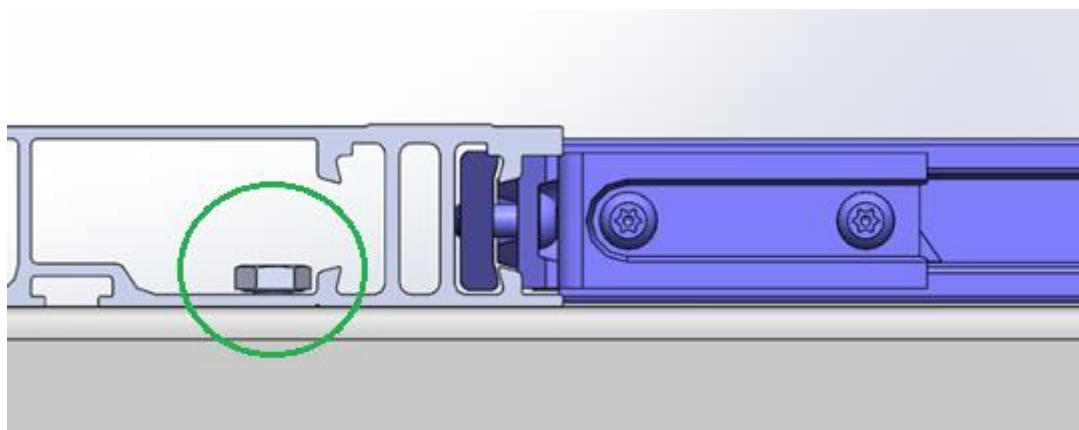


Figura 38 – Alteração da fixação do provete

Esta solução impõem a deformação na zona de ligação entre os dois perfis.

#### 4.4.1 Ensaio do provete 1, perfil da janela com momento positivo

No ensaio do primeiro provete verifica-se que tanto o perfil A como o perfil B não sofreram deformações permanentes apreciáveis. Neste ensaio observou-se que os elementos que sofreram maiores deformações e mesmo rotura foram o canto e a fêmea. O canto de ligação obteve uma deformação plástica considerável, mas não foi detetada alguma marca de rotura. Em relação ao parafuso não foram verificados sinais que evidenciem grande esforço, mas por outro lado verifica-se que a fêmea entrou em rotura sendo este o único elemento que entrou em colapso. Da Figura 39 a Figura 43 podemos verificar os acontecimentos acima descritos.

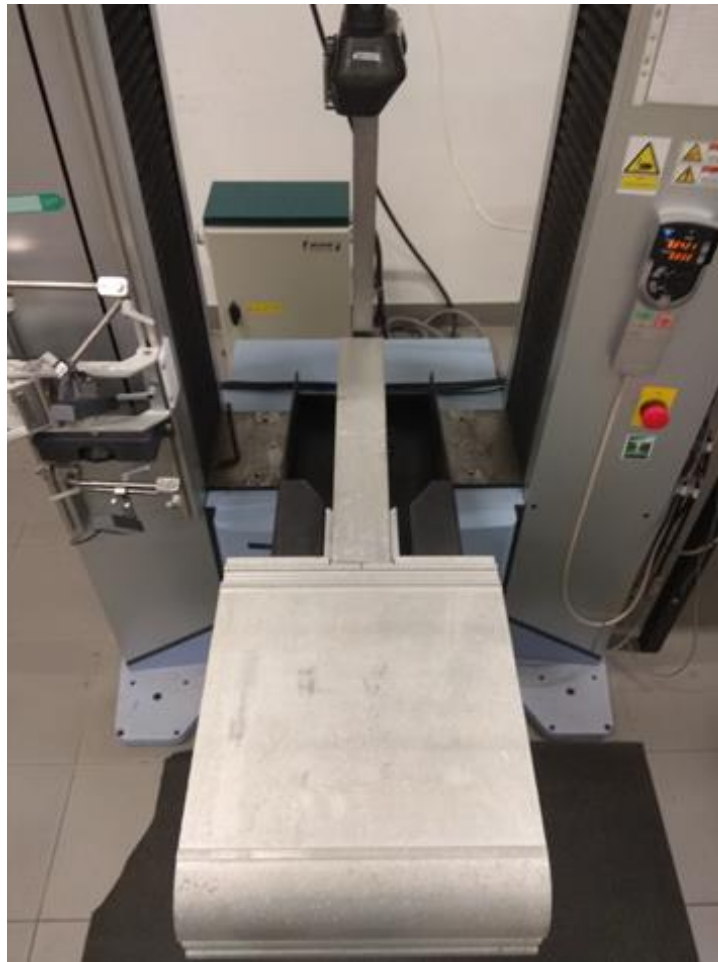


Figura 39 – Ensaio provete 1, montagem

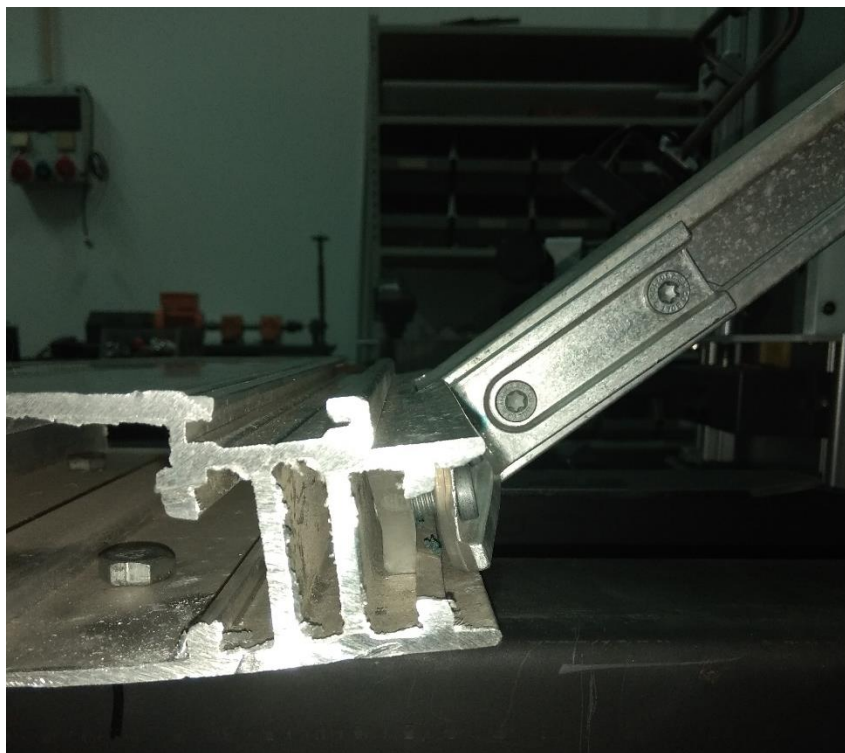


Figura 40 – Ensaio provete 1, instante anterior da rotura



Figura 41 – Ensaio provete 1, fêmea fissurada

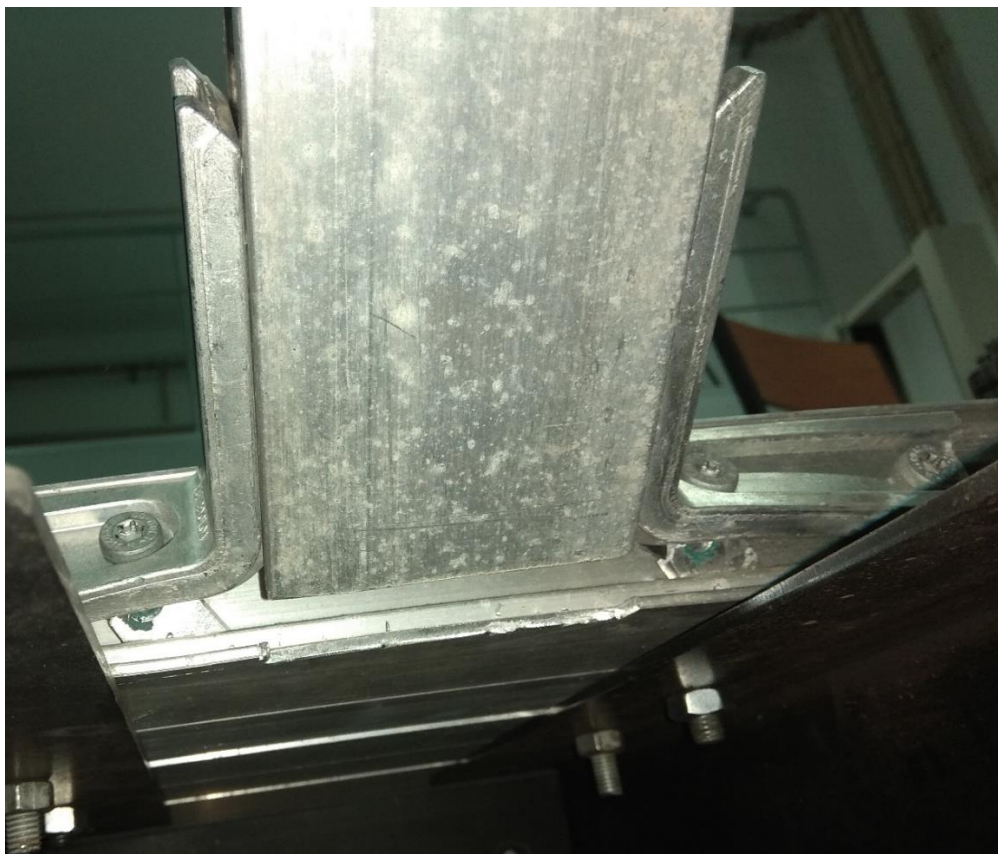


Figura 42 – Ensaio provete 1, fêmea colapsada.



Figura 43 – Fêmea e parafuso após execução do ensaio 1

#### 4.4.2 Ensaio do provete 2, perfil da janela com momento negativo

No ensaio do segundo provete é aplicado um momento no sentido contrário de forma a perceber se o comportamento da ligação será diferente uma vez que o perfil B é assimétrico. Neste ensaio é verificado que o perfil B sofreu uma deformação permanente junto à ligação aparafusada.

Este acontecimento, que podemos verificar na Figura 45, deve estar relacionado com o facto da parte do perfil que está à compressão ter uma secção resistente inferior à do ensaio anterior.

O canto de ligação obteve uma deformação plástica considerável, mas não chegou à rotura. À semelhança do resultado do provete 1 o parafuso manteve íntegro, mas por outro lado a fêmea entrou em rotura como podemos verificar na Figura 47. Resumidamente os resultados foram muito semelhantes aos do ensaio do primeiro provete à exceção da deformação localizada no perfil B. Da Figura 44 a Figura 47 podemos verificar os acontecimentos acima descritos.

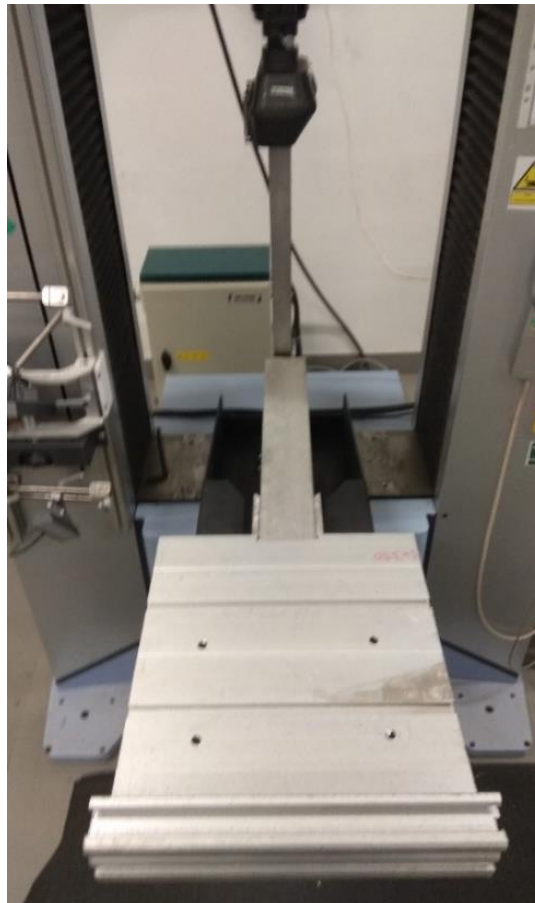


Figura 44 – Ensaio provete 2, montagem



Figura 45 – Ensaio provete 2, deformação perfil B

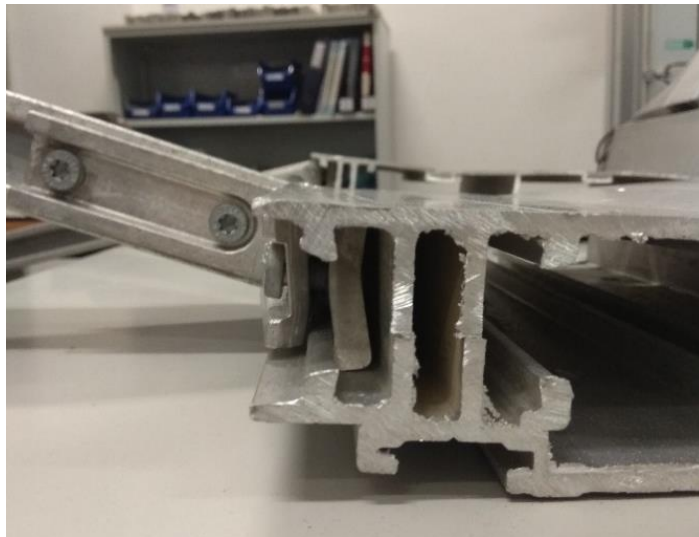


Figura 46 – Ensaio provete 2, após rotura



Figura 47 – Ensaio provete 2, rotura das fêmeas

#### 4.4.3 Ensaio ao provete 3, perfil do tejadilho

A secção transversal do perfil do tejadilho é igual ao do perfil de janela. Como já referido, a ligação entre o perfil do tejadilho e o perfil B usa cantos diferentes. A diferença no seu desenho promove uma ligação com uma rigidez superior como pode ser observado nas curvas de comportamento apresentadas no subcapítulo 4.5.

O ensaio deste provete seguiu os mesmos passos que os provetes anteriores.

Neste ensaio podemos observar que tanto as fêmeas como os cantos entraram em rotura. Na Figura 49 e Figura 50, podemos verificar que apenas as fêmeas mais próximas do centro do perfil entraram em rotura, já os cantos romperam precisamente nos locais onde as fêmeas não colapsaram. Com isto verificamos que este canto entrou em rotura mostrando uma fratura frágil (sem grande deformação plástica) na zona do parafuso mais afastado.

À semelhança de todos os outros resultados os parafusos mantiveram-se íntegros sem deformações aparentes.

A Figura 48 mostra o dispositivo de ensaio e o provete 3 montado e pronto a ser ensaiado.



Figura 48 – Ensaio provete 3, montagem

Na Figura 49 é visível a rotura das fêmeas interiores e rotura da parte exterior dos cantos de ligação. Não se observa qualquer deformação plástica dos perfis ligados. Esta observação sugere que o ponto fraco das ligações são as fêmeas e os cantos devendo estes serem melhorados.



Figura 49 – Ensaio provete 3, rotura das fêmeas

Na Figura 50 pode ser observado a rotura frágil da extremidade do canto de reforço do provete 3.



Figura 50 – Ensaio provete 3, rotura do canto

#### 4.4.4 Ensaio ao provete 4, perfil do tejadilho

O provete 4 estava inicialmente destinado para um ensaio com aplicação de um momento no sentido inverso ao provete 3. Isto tinha intuito a caracterização sumária da ligação do perfil do tejadilho ao perfil B em ambos os sentidos. No entanto devido às dificuldades com dispositivo de ensaio, o ensaio 4 foi realizado com o momento no mesmo sentido que o provete 3.

O modo de ruína do provete 4, que correspondem aos perfis do tejadilho, foi muito idêntico ao provete 3. Assim sendo é considerada a mesma apreciação dos modos de deformação dos elementos. Na

Figura 51 verificamos a rotura do canto e das fêmeas e na Figura 52 podemos observar o decorrer do ensaio em diferentes momentos. As imagens são retiradas de uma gravação de vídeo do ensaio do provete 4 com um deslocamento do travessão da máquina de 50 [mm/min].



Figura 51 – Ensaio provete 4, rotura do canto e fêmeas



Figura 52 – Ensaio provete 4, frames

## 4.5 Resultados

Neste subcapítulo serão apresentadas as curvas de comportamento das ligações, momento vs ângulo de rotação.

### 4.5.1 Curva característica da ligação dos perfis de janela

Serão apresentados os resultados do provete 1 e 2 que correspondem às ligações dos perfis de janela.

A ligação do provete 1 teve um momento máximo de 770 N.m que ocorre para um ângulo de rotação de 24°.

A ligação do provete 2 teve um momento máximo de 750 N.m que ocorre para um ângulo de rotação de 18°, a rotação máxima do ensaio foi de 40°.

Na Figura 53 são apresentadas as curvas momento-ângulo de rotação correspondentes aos resultados dos ensaios dos provetes 1 e 2.

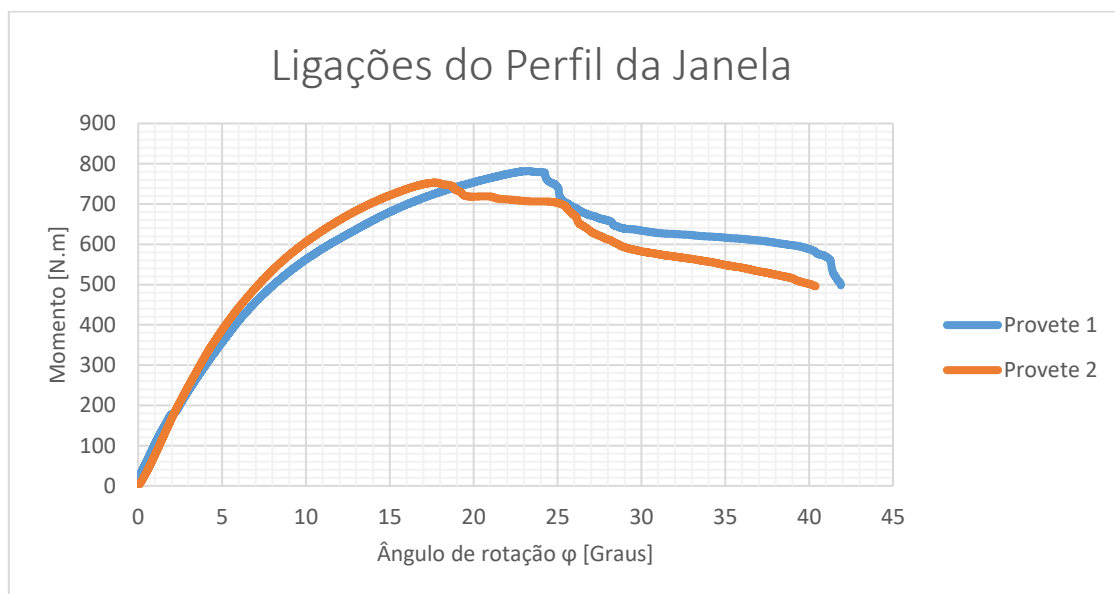


Figura 53 – Curvas Momento-Angulo de rotação do provete 1 e 2

Como se pode observar nas curvas há uma considerável transmissão de momento para além do valor de rotação onde ocorre o seu máximo. Para o provete 1 o máximo de 770 N.m ocorre para 24° de rotação, mas para 40° de rotação a ligação ainda resiste com 600 N.m.

Para o provete 2 o máximo de 750 N.m ocorre para 18° de rotação, mas para 40° de rotação a ligação ainda resiste com 500 N.m.

Esta observação é importante do ponto de vista da absorção de energia da estrutura.

Como já mencionado anteriormente nestes provetes verificou-se a rotura das fêmeas mais próximas do interior da ligação. Foi possível verificar durante o ensaio que as

fêmeas colapsaram desfasadamente. Este fenómeno foi mais perceptível no ensaio do provete 2, assim sendo a seguinte descrição é relativa a esse mesmo.

As roturas das fêmeas tiveram a seguinte sequencia, primeira ocorreu a uma rotação de  $16^\circ$  e um momento de 738 N.m. A segunda ocorreu a uma rotação de  $20^\circ$  e um momento de 718 N.m. Podemos verificar no gráfico que no instante após a primeira rotura não se verificou nenhuma queda do momento aplicado, o valor apenas começou a baixar aos  $18^\circ$  de rotação que foi quando a segunda fêmea começou a ceder plasticamente até à sua rotura aos  $20^\circ$  de rotação.

#### 4.5.2 Curva característica da ligação dos perfis de tejadilho

Serão apresentados os resultados do provete 3 e 4 que correspondem às ligações dos perfis do tejadilho.

A ligação do provete 3 teve um momento máximo de 860 N.m com um ângulo de rotação de 29 graus.

A ligação do provete 4 teve um momento máximo de 850 N.m com um ângulo de rotação de 24 graus.

Na Figura 54 são apresentadas as curvas momento-ângulo de rotação correspondentes aos resultados dos ensaios dos provetes 3 e 4.

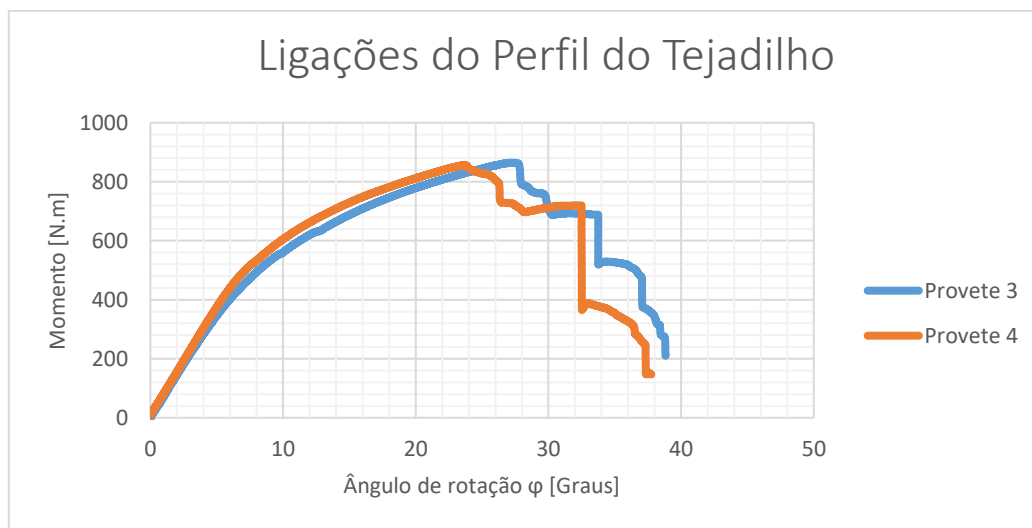


Figura 54 – Curvas Momento-Angulo de rotação do provete 3 e 4

É verificado que embora o canto da ligação usado nos provetes 3 e 4 tenham entrado em rotura a ligação obteve uma maior resistência.

Observa-se nos gráficos um valor de momento máximo ligeiramente superior em relação à ligação de janela e também uma rotação ligeiramente maior até ao momento máximo. No entanto observa-se que depois de atingir o valor máximo de momento este decai mais rapidamente.

Durante o ensaio desta ligação existem dois instantes onde houve uma grande queda de momento aplicado, foi no momento da rotura do canto e das fêmeas M8. No gráfico da Figura 54 mostra a ordem de grandeza dos acontecimentos assim como a coerência na deformação entre o provete 3 e 4, visto que as condições de ensaio foram as mesmas. No provete 4 o primeiro elemento a entrar em rotura foi o canto. Este foi o maior responsável da queda da resistência da ligação que ocorreu a uma rotação de 33°. De seguida foram as fêmeas M8, sendo que estas entraram em rotura aos 36° praticamente em simultâneo.

# 5

## ENSAIOS DE TRAÇÃO

- 5.1 Introdução dos ensaios de tração
- 5.2 Preparação dos provetes
- 5.3 Execução dos ensaios e resultados



## 5.1 Introdução dos ensaios de tração

No capítulo 6 são apresentados os procedimentos e resultados da simulação pelo método dos elementos finitos das ligações ensaiadas. Uma vez que a simulação considerou o comportamento plástico dos materiais é fundamental obter a curva de tensão vs deformação para estes.

Os materiais em causa, perfis e cantos, estão bem identificados pelo fornecedor dos mesmos, no entanto para introdução no software de cálculo é fundamental o conhecimento da curva real do comportamento deste material. O fornecedor dos perfis não facultava estas curvas pelo que no decorrer deste trabalho foi decidido estabelecer um programa de ensaios para as determinar.

Foram efetuados ensaios de tração ao material dos perfis representados na figura 55 com objetivo de certificar as propriedades mecânicas dos mesmos. Como podemos verificar as ligas que foram analisadas são a 6005A T6 e a 6106 T6 respetivamente designados como perfil A e B.

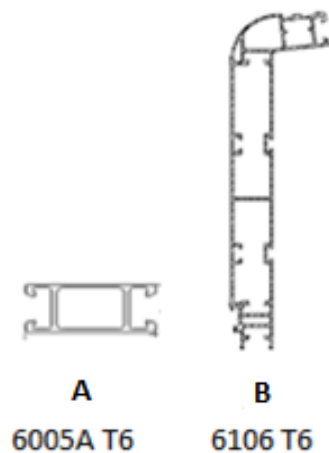


Figura 55 - Perfis ensaiados

Embora já tenha sido revelado pelos ensaios que estes elementos não entram em rotura e apresentam diminuta deformação plástica revelando pouca importância no estudo do desempenho da ligação aparafusada, estes ensaios foram elaborados com o intuito de recolher dados para inserir na simulação numérica e também fazer a comparação com os dados disponibilizados pelo fabricante.

Infelizmente não foi possível elaborar ensaios do material dos cantos e das fêmeas mesmo sendo estes os elementos mais importantes deste estudo. A razão foi pela dimensão e complexidade da geometria que estas peças possuem, o que tornou impossível elaborar provetes destes mesmos para ensaio.

Os provetes foram retirados das almas dos perfis A e B, disponibilizados pela empresa CaetanoBus, através uma operação de CNC.

As propriedades que foram analisadas são a tensão de cedência, a tensão de rotura e o alongamento. Estes resultados foram considerados na parametrização do material no programa de elementos finitos com o intuito de obter uma simulação o mais realista possível do que compete as conclusões deste capítulo.

## 5.2 Preparação dos provetes

Foram efetuados 9 provetes retirados da alma do perfil através de operações de maquiagem como é verificado na Figura 56.



Figura 56 - Maquiagem dos provetes

As dimensões dos provetes foram obtidas com base da norma NP EN 10002-1 [20], para ensaios de tração à temperatura ambiente. Segundo a norma a ligação entre as suas cabeças de amarração e a parte útil do provete deve contemplar zonas de concordância igual ou superior a um raio de 12 mm. Relativamente à sua secção a norma sugere que não seja ultrapassada a relação de 8:1 entre a largura e a espessura do provete. Para os provetes executados foi considerado um raio de concordância de 12 mm e uma relação de 6:1, ver Figura 57.

O comprimento inicial entre referencias para mediação das deformações é definida pela expressão (1.3)

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0} \quad (1.3).$$

Sendo  $S_0$  a área da secção da zona útil.

O comprimento da zona útil deverá ser superior ou igual à da expressão (1.4)

$$L_c = L_0 + 1.5\sqrt{S_0} \quad (1.4)$$

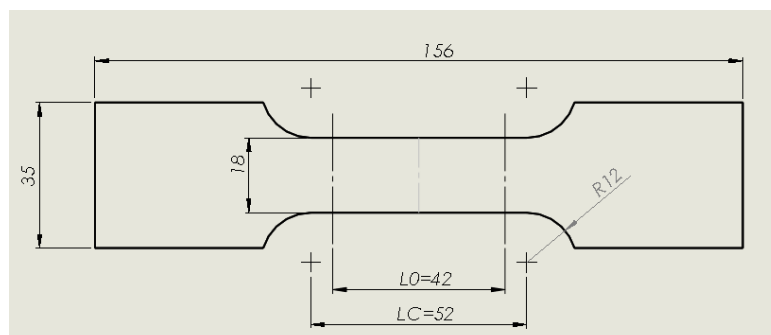


Figura 57 - Desenho com dimensões do provete

Como é verificado na Figura 58 foram preparados vários provetes. Os de numeração de 1 a 5 correspondem ao perfil tipo A com uma espessura de 2,9 mm e os de numeração de 6 a 9 correspondem ao perfil tipo B com uma espessura de 3,3mm. Para efeitos de ensaio apenas serão considerados 4 provetes de cada perfil, 1 a 4 e de 6 a 9 respetivamente

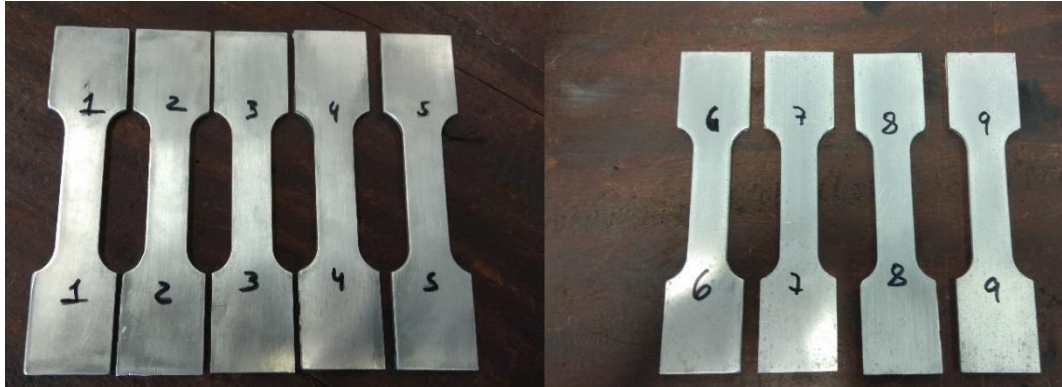


Figura 58 Provetes para os ensaios

### 5.3 Execução dos ensaios e resultados

Os ensaios de tração foram efetuados na máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 kN, instalada no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP Figura 59 a). Para a realização dos ensaios é necessário a configuração da máquina de ensaio. Foi utilizada uma célula de carga de 100 kN e a máquina foi configurada aplicar um deslocamento com uma velocidade 5 mm/min. Foram retirados os registos dos valores de força em função do deslocamento sendo estes convertidos à posteriori em valores de tensão e deformação. Os valores da tensão e deformação foram calculados com as áreas de secção dos provetes A e B de 52 e 59 mm<sup>2</sup> respetivamente.

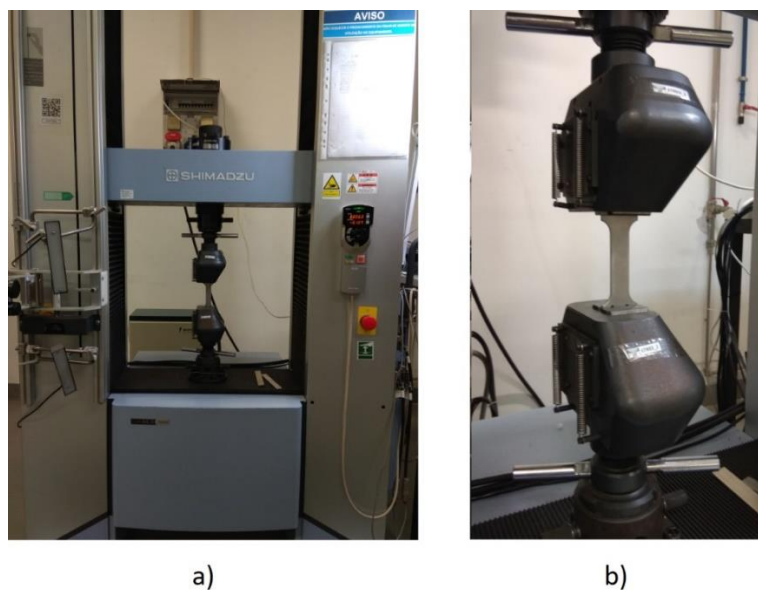


Figura 59 a) Máquina de ensaio Shimadzu AG-X 100 kN b) Instalação do provete

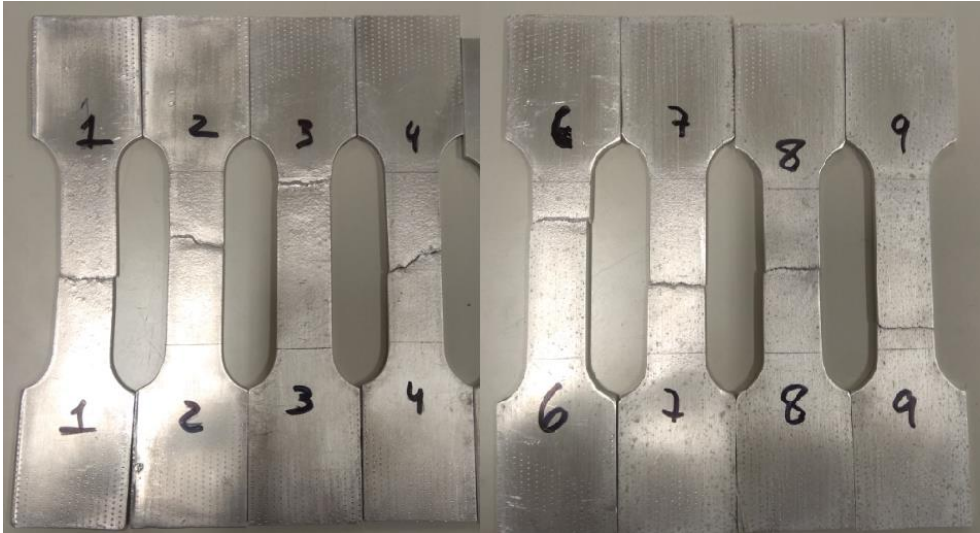


Figura 60 Provetes após os ensaios

Numa análise visual, ver Figura 60, é verificado que os modos de rotura dos provetes foram satisfatórios. Existe apenas alguma incoerência nos locais onde ocorreu a rotura embora todas tenham acontecido na zona útil do provete. Isto poderá ter acontecido devido a alguma variação geométrica na fase de preparação dos provetes. Na Figura 61 e Figura 62 apresentam os resultados dos ensaios de tração com base nas curvas tensão-deformação. Os resultados apresentam bastante coerência embora o provete 8 tenha tido uma rotura um pouco prematura em comparação aos restantes. Este acontecimento poderá ter acontecido devido a alguma irregularidade geométrica do provete.

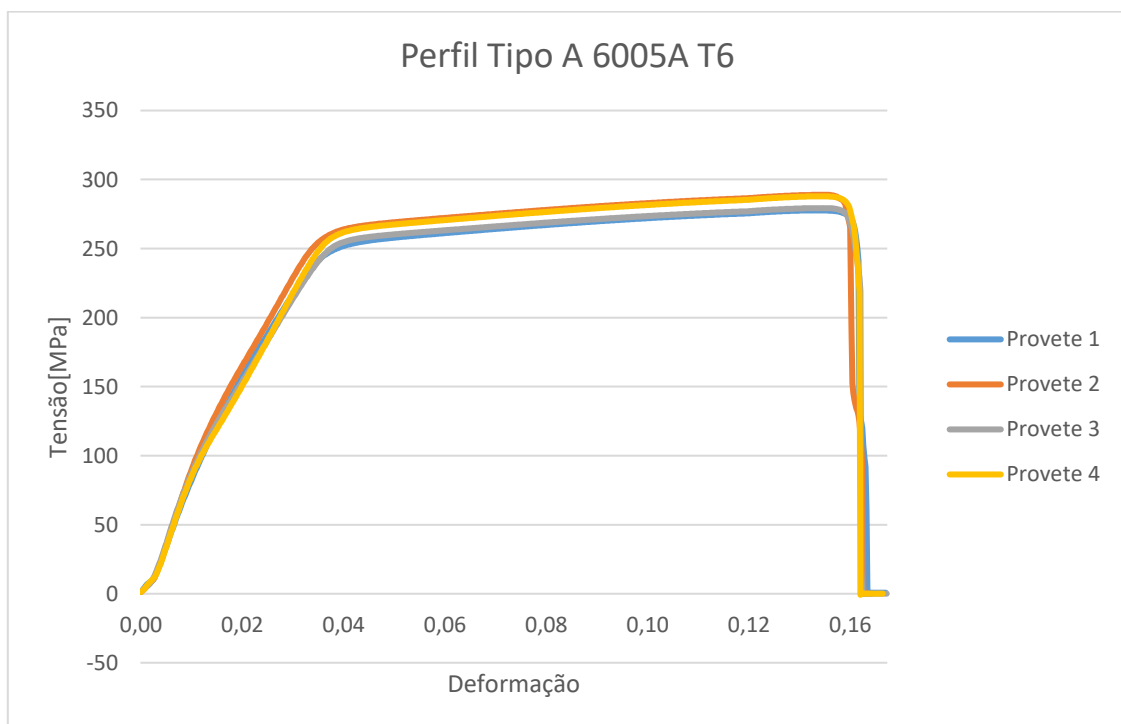


Figura 61 - Curvas de tensão-deformação dos provetes 1 a 4

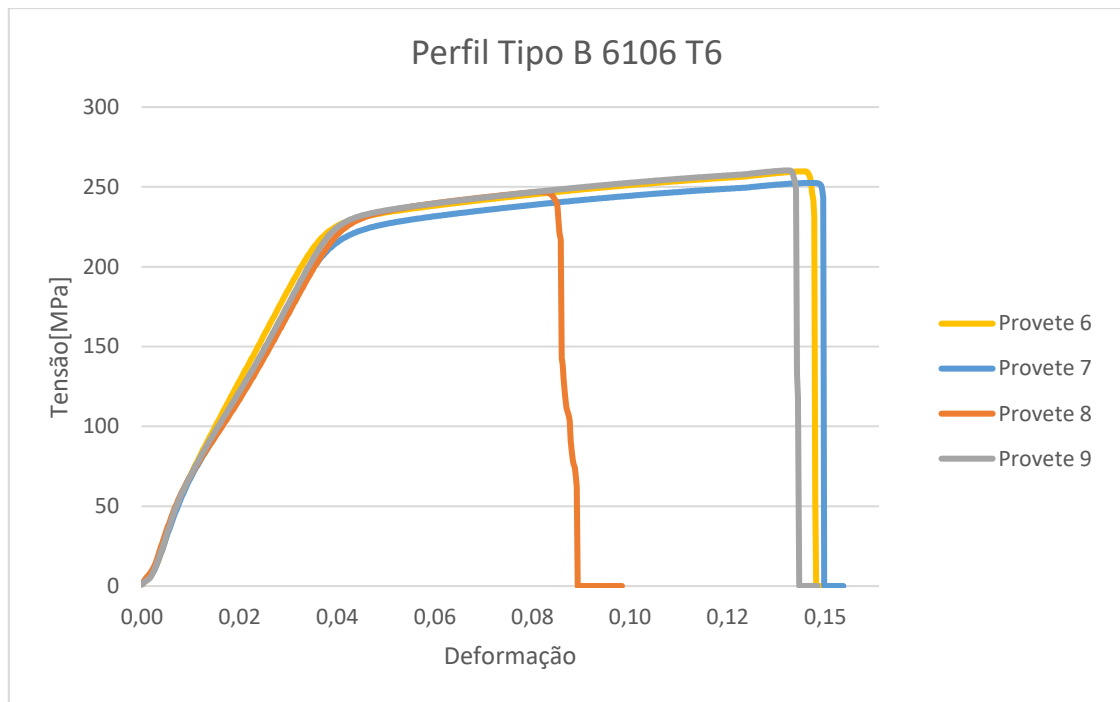


Figura 62 - Curvas de tensão-deformação dos provetes 6 a 9

Na Tabela 14 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas dos ensaios, sendo  $R_e$  a tensão de cedência,  $R_m$  a tensão de rotura e  $A$  a extensão após rotura.

Tabela 14 – Resultados das propriedades mecânicas dos ensaios

Provete	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]
1	245	277,7	10,5
2	265	288,9	11,6
3	255	279,3	11,4
4	260	287,9	11,4
6	230	259,8	7,0
7	225	252,5	8,8
8	230	246,9	3,6
9	235	260,3	8,0

Tendo em conta os valores especificados pelo fabricante sendo para a liga 6005A T6  $R_e = 225$  MPa,  $R_m = 270$  MPa,  $A = 8\%$  e para a liga 6106 T6  $R_e = 200$  MPa,  $R_m = 250$  MPa,  $A = 8\%$ , verificamos que os resultados obtidos nos provetes, à exceção do provete 8, apresentam valores acima do que é assumido pelo fabricante. Estes ensaios foram executados com o intuito de colher valores reais sobre as propriedades mecânicas dos materiais. A média destes resultados serão utilizados na parametrização do software de simulação por elementos finitos com o fim obter resultados mais próximos da realidade.



# 6

## APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

### **6.1** Introdução da simulação numérica

### **6.2** Preparação do modelo

- 6.2.1 Modelo 3D e malha
- 6.2.2 Materiais
- 6.2.3 Condições Fronteira

### **6.3** Simulação



## 6.1 Introdução da simulação numérica

A simulação pelo método de elementos finitos, no âmbito estrutural, tem o objetivo determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido sujeito a solicitações exteriores usando soluções aproximadas baseadas em técnicas numéricas de resolução computacional.

A presente simulação tem como principal objetivo determinar qual os parâmetros mais convenientes e adequados para se poder simular a realidade do ensaio o mais fielmente possível, isto é, qual o tipo de elemento mais adequado e a formulação mais adequada. Os principais aspetos a serem analisados nos elementos constituintes da ligação são, a deformada, o estado de tensão e a reação obtida equivalente ao deslocamento imposto pela máquina nos ensaios laboratoriais. Assim sendo será imprescindível o rigor na reprodução em software de todos os pormenores relativos ao ensaio laboratorial. Dadas as características da ligação e as deformações verificadas em laboratório, neste capítulo será efetuada uma simulação não linear.

Tendo em conta o grau de complexidade da simulação apenas foi possível efetuar uma simulação correspondente à ligação dos perfis das janelas. Os resultados desta simulação serão comparados com os resultados do provete 2, pois foi através deste que se obteve maior perceção dos acontecimentos durante o ensaio.

Os softwares utilizados neste caso de estudo foram o *SpaceClaim* para manipulação geométrica dos sólidos e módulo *Mechanical* do software *Ansys Workbench* para efetuar a simulação do modelo.

## 6.2 Preparação do modelo

A preparação do modelo em software tem por base todas as condições fronteiras existentes no ensaio em laboratório. Visto que objetivo é estudar com algum rigor o domínio elástico e plástico da ligação, a preparação do modelo contemplará a não linearidade no material, geométrica e de contacto.

A dimensão do modelo, embora seja reduzido comparativamente com o resto da estrutura, acabou por ser muito pesado para a execução da simulação. Foram verificados muitos problemas de convergência dos resultados. Assim sendo a preparação do modelo foi uma etapa que sofreu muitas alterações durante todo o processo de simulação.

### 6.2.1 Modelo 3D e malha

Inicialmente as ligações entre os perfis A e B foram integralmente modeladas com o intuito de serem analisadas pelo método FEA

Na Figura 63 podemos verificar o primeiro modelo 3D importado para a preparação no software *SpaceClaim*.

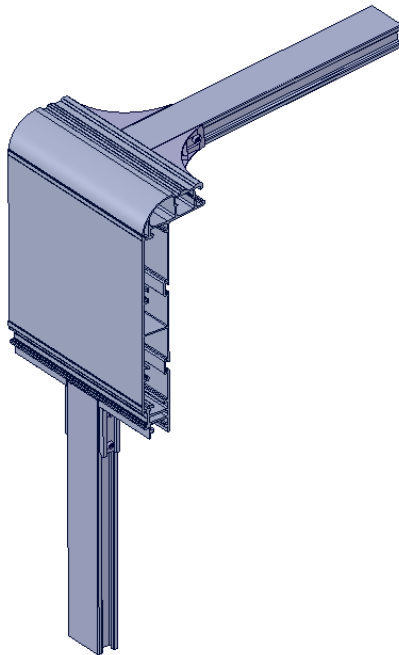


Figura 63 – Primeira abordagem da preparação geométrica do modelo.

Esta preparação serviu para fazer algumas correções de espessuras, raios de curvatura assim como alguns ângulos importantes que tem implicações com a montagem entre elementos. Além dessas correções mais rigorosas também efetuada uma simplificação do modelo retirando furos, boleados e outros elementos que não torna a estrutura comprometida quanto ao seu desempenho. Esta fase de preparação é muito importante pois irá ter muito impacto nos resultados e na velocidade de cálculo.

Como podemos observar na Figura 64 o objetivo inicial foi executar uma simulação com a aplicação de um deslocamento em cada ponta do perfil equivalente ao deslocamento  $d1$  e  $d2$  imposto pela máquina nos ensaios laboratoriais. Deste modo tanto a ligação da janela como do tejadilho eram simuladas em simultâneo. No entanto foi chegada à conclusão que além de ser inviável por questões computacionais os resultados iam ser influenciados pela ação da combinação dos deslocamentos através do perfil encastrado que une ambas as ligações.

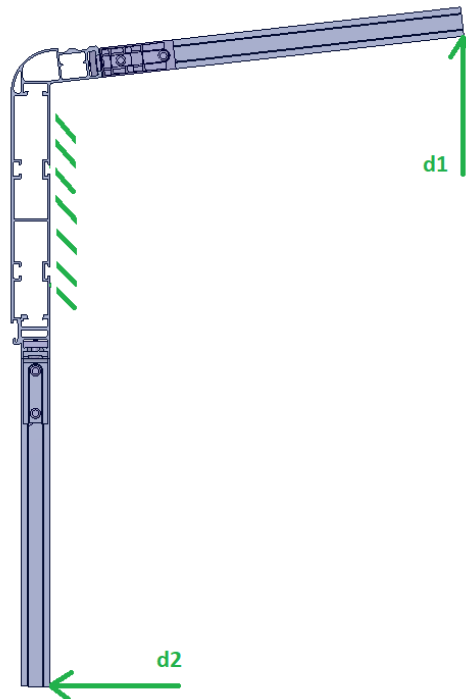


Figura 64 – Primeira abordagem do modo de aplicação das condições de fronteira.

Tendo em conta o verificado, será apenas efetuada a simulação da ligação do perfil da janela.

Através de um processo iterativo foram realizadas sucessivas simplificações do modelo, uma vez que a ligação como se apresenta na Figura 64 demorou vários dias de processamento de máquina e não chegou ao final. Assim foi decidido reduzir o tamanho do modelo até obter algo executável com um tempo razoável de processamento.

A simplificação geométrica baseou-se na definição de um plano de simetria e no corte do excedente que corresponde à ligação do perfil do tejadilho.

Podemos também observar que foram retiradas as fêmeas e os parafusos do perfil onde foi aplicado o deslocamento. Esta ação foi tomada pelo facto de ser verificado durante os ensaios que o perfil não teve deformações significativas e que este também não teve deslocamentos relativos com o canto. Assim sendo o perfil foi reduzido de 500mm de comprimento para 200mm e ligação foi considerada *Bonded*.

Na Figura 65 podemos observar o modelo simplificado utilizado na simulação.

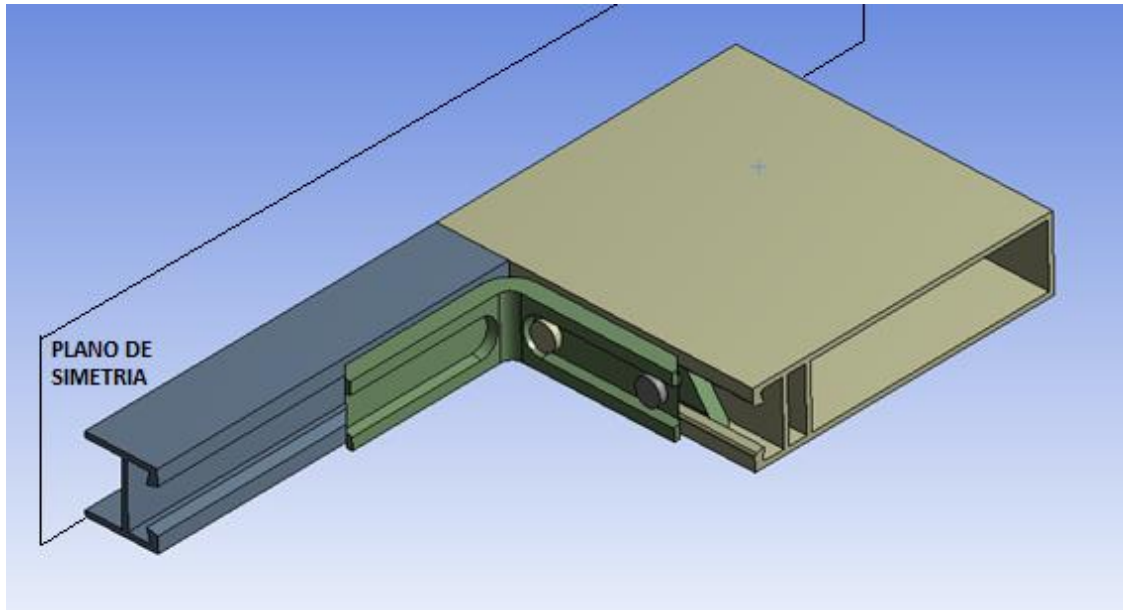


Figura 65 – Modelo simplificado para simulação.

Esta etapa exigiu uma especial atenção porque a geometria dos componentes é complexa e exige a aplicação de algumas ferramentas do software para a criação da malha e condições fronteiriças.

O processo de criação da malha foi também iterativo até obter uma boa relação entre a sua qualidade e o tempo de processamento, visto que a capacidade computacional existente é limitada.

Na Figura 66 podemos observar a malha que foi utilizada para efetuar a simulação.

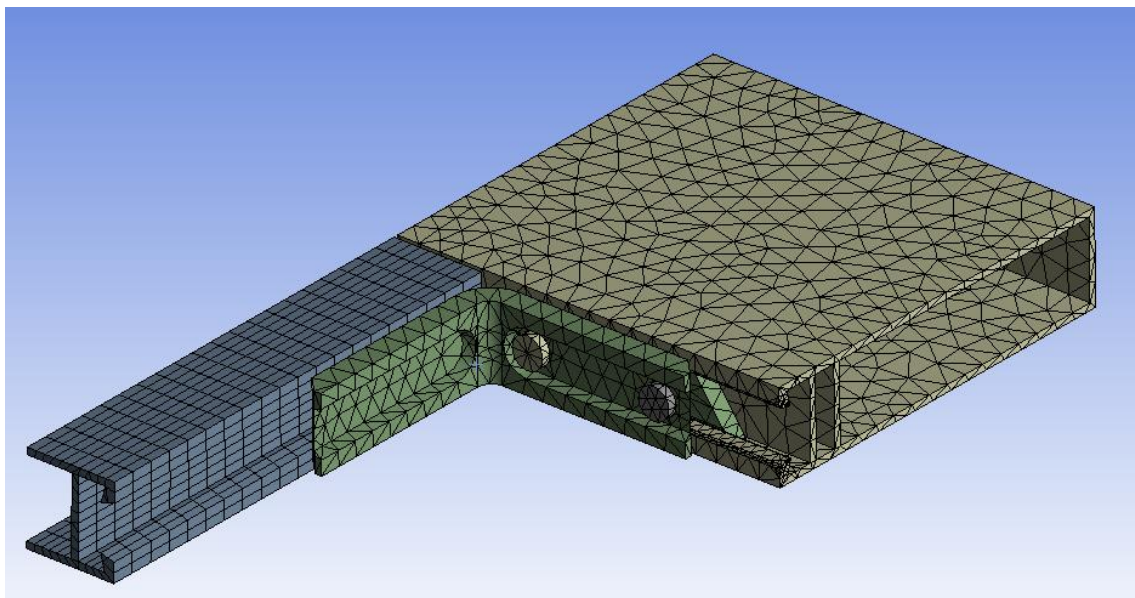


Figura 66 – Modelo com malha.

Esta malha é composta por elementos tetraédricos, hexaédricos e prismáticos. A malha tem um total número de elementos de 18205 e um número de nós de 35110. No Ansys é possível verificar a qualidade dos elementos, sua distorção, quantidade de cada tipo, valores mínimos, máximos, médio e desvio padrão através da ferramenta *Mesh Metric*. Pode ser também visualizado um gráfico de barras com a uma legenda de cores correspondente ao tipo de elemento. No gráfico são apresentados os números de elementos em função da sua qualidade. A qualidade é compreendida com um valor entre 0 e 1. Os elementos com um valor próximo de zero são os de pior qualidade, e os próximos de um são os de melhor qualidade. Os valores da qualidade são calculados através de uma fórmula matemática e processados pelo software em função dos *inputs* do utilizador.

Na Figura 67 apresenta o gráfico correspondente à malha criada para o modelo de estudo.

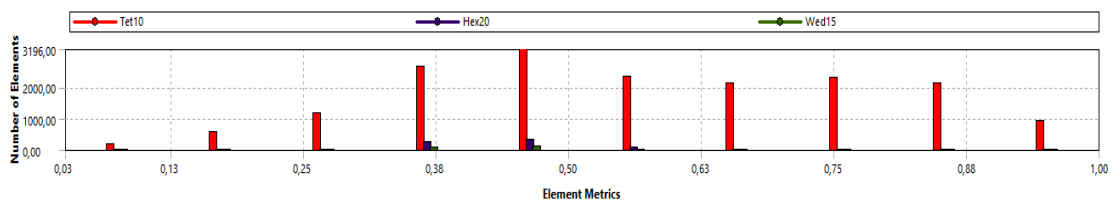


Figura 67 – Gráfico *Mesh Metric*.

Para complementar a interpretação do gráfico podemos visualizar os elementos que correspondem a cada barra presente no gráfico.

Na Figura 68 podemos observar o modo de representação dos elementos, neste caso é possível visualizar os elementos tetraédricos de melhor e pior qualidade presentes na malha.

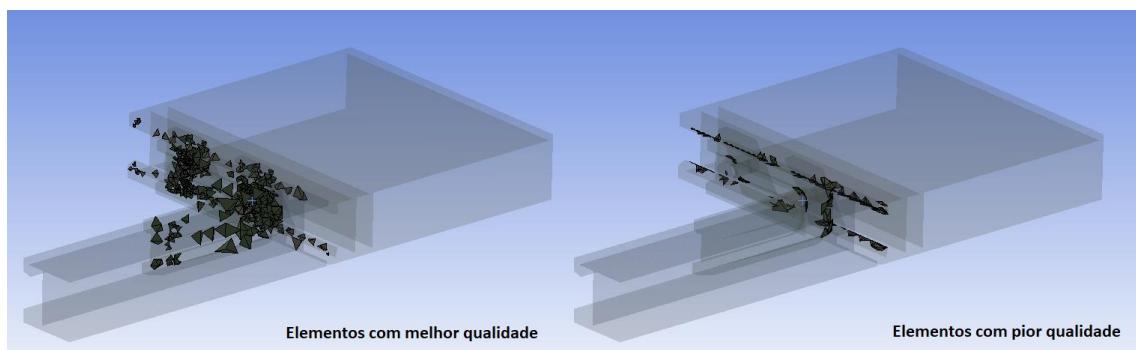


Figura 68 – Visualização dos elementos em função da qualidade

Tendo em conta os *outputs* fornecidos pelo software é concluído que a malha está razoável para a simulação.

### 6.2.2 Materiais

As propriedades dos materiais selecionados para o modelo devem ser as mais realistas possíveis para que estas não tenham influência nos resultados na simulação. Assim sendo as propriedades dos materiais neste caso de estudo serão definidas com base dos resultados obtidos dos ensaios de tração. Esta prática foi apenas aplicada aos materiais que estiveram sujeitos a ensaios de tração, os outros serão definidos com base nas características técnicas fornecidas pelo fabricante. Na tabela 15 é apresentada a lista dos materiais inseridos na biblioteca do software.

Tabela 15 – Lista de materiais criados na biblioteca do *Mechanical Ansys Workbench*.

Elementos	Materiais
Parafusos M8 8.8	Aço
Cantos	AL EN AW – 6082 T6
Fêmea M8	AL EN AW – 6060 T6
Prumos	AL EN AW – 6005A T6
Sanca	AL EN AW – 6106 T6

Como o caso de estudo contempla o domínio plástico, foi utilizada a ferramenta *Bilinear Isotropic Hardening* disponível no software para, de uma forma aproximada, representar a não linearidade dos materiais.

Como já mencionado anteriormente as ligas que foram ensaiadas foram a liga 6005A T6 e a liga 6106 T6. Assim sendo os resultados destes foram considerados na parametrização do software contemplando o valor médio obtido do limite elástico e plástico.

Na Figura 69 podemos ver o exemplo do gráfico aplicado na liga 6060 T6 correspondente ao material da fêmea.

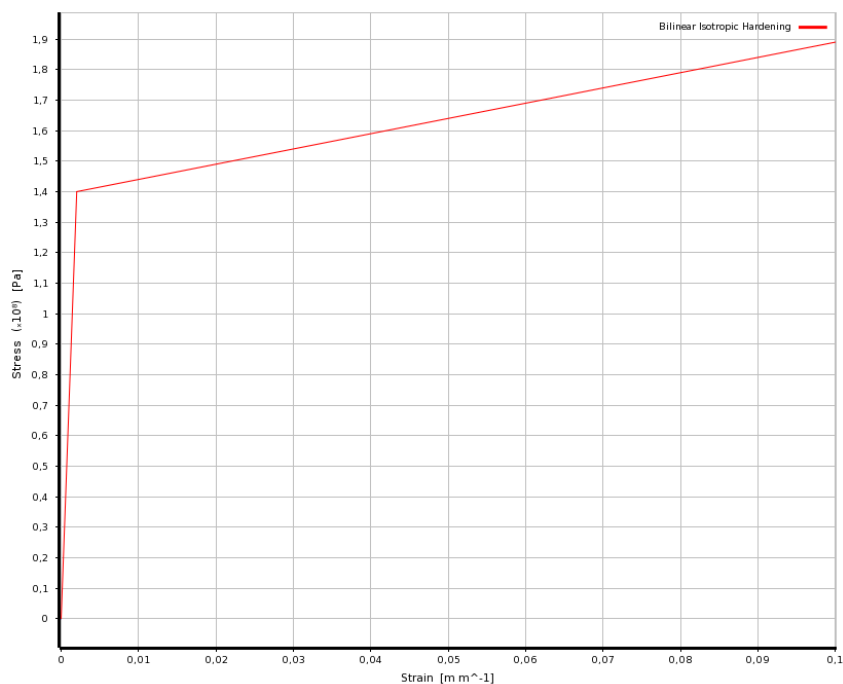


Figura 69 – Parametrização da liga 6060 T6 no *Ansys Workbench*.

### 6.2.3 Condições Fronteira

Neste subcapítulo serão apresentadas as condições fronteira aplicadas ao modelo. Na formulação deste estudo foram considerados elementos de contacto lineares e não lineares entre as partes de um estudo multicorpo, a pré-carga dos parafusos e os suportes de fixação. O carregamento aplicado foi do tipo deslocamento imposto. Os primeiros aspetos que foram considerados na preparação da simulação foram as condições fronteira para simular os apoios do provete. Foi aplicado um deslocamento para atingir uma rotação idêntica à que se obteve nos ensaios. O modelo pode ser observado na Figura 70.

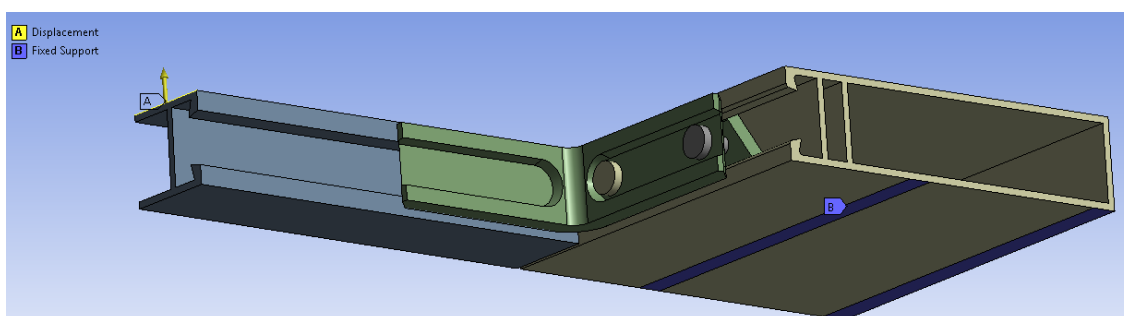


Figura 70 – Aplicação das condições fronteira no modelo

Na Figura 70 podemos verificar que as fixações estão localizadas nas zonas destacadas a azul. Estas zonas correspondem aos locais onde foram colocados os parafusos durante o ensaio.

No ponto A foi imposto um deslocamento de 56 mm. Este deslocamento foi definido em função do instante em que se deu início à rotura da ligação durante o ensaio. Este ocorreu aos 16° de rotação com a rotura de uma das fêmeas. Também é de salientar que como na simulação o comprimento do perfil foi reduzido o valor de força foi ajustado para garantir o mesmo valor de momento na ligação.

Em relação aos contactos foram considerados os mais apropriados para cada situação. A maioria dos contactos foram definidos com fricção, considerando um coeficiente de atrito de 0,2. O contacto entre o canto e o perfil de janela foi considerado *Bonded*, esta ação foi tomada pelo facto de não existir deslocamentos relativos entre eles. Entre a face do parafuso e a face do furo da fêmea também foi considerado um contacto *Bonded*. Na Figura 71 são indicadas as zonas de contacto entre as partes do modelo que tiveram a formulação dos elementos de contacto.

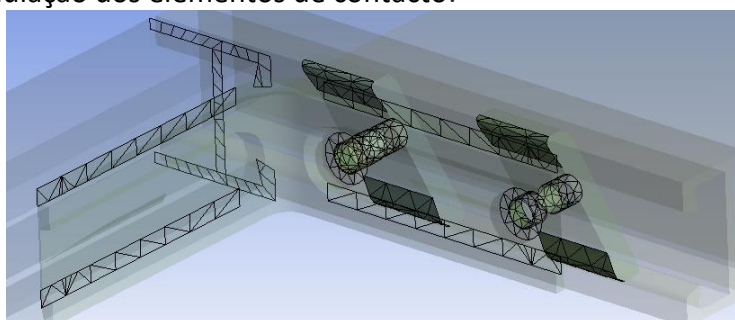


Figura 71 – Contactos dos elementos

A pré-carga dos parafusos no modelo foi definida com a aplicação de um cálculo com a formulação de *Yanyao Jiang* [18] abordada no subcapítulo 2.5 da revisão bibliográfica. A pré-carga dos parafusos M8 foi calculada com seguinte expressão:

$$T = P \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_t r_t}{\cos \beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1.2).$$

Onde :

$$T = 21\text{N.m};$$

$$p = 1,25;$$

$$\mu_t = 0,12;$$

$$r_t = 3,55;$$

$$\mu_n = 0,1;$$

$$r_n = 7\text{mm}$$

Resolvendo a equação em ordem a P, foi obtida uma pré-carga de 15100 N, sendo este o valor utilizado na preparação do modelo.

### 6.3 Simulação

Como mencionado anteriormente, os resultados desta simulação serão comparados com os resultados do provete 2, pois foi através deste provete que se obteve uma maior percepção dos acontecimentos durante o ensaio.

Como descrito nos resultados do ensaio 2 as fêmeas colapsaram desfasadamente, assim sendo a simulação só fará sentido ser executada até ao momento da ocorrência da primeira rotura.

Na Figura 72 a Figura 75 podemos observar o estado de tensão e a deformada do modelo.

Na Figura 72 pode observar-se a deformada da ligação e respetiva distribuição de tensões. É notória que o perfil de janela não sofre deformação é observada alguma deformação na parte simulada do perfil B (sanca).

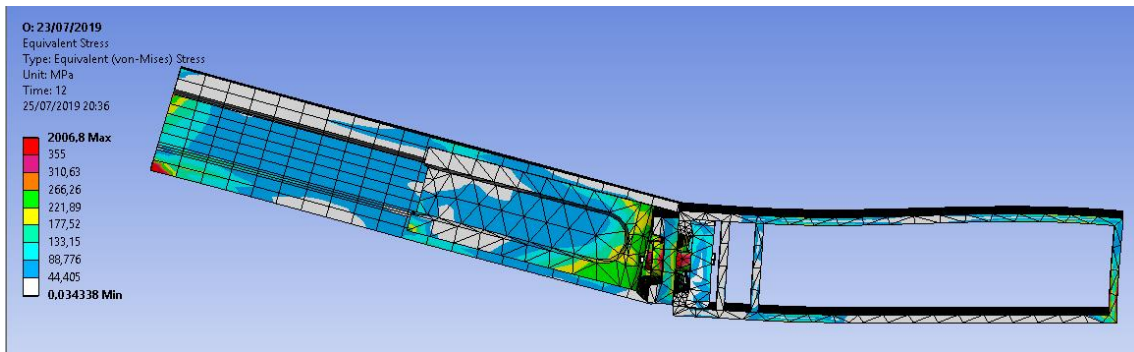


Figura 72 – Estado de tensões provete global

Na Figura 73 o modelo apresentado em perspetiva denota tensões elevadas no ponto de aplicação da carga no perfil da janela e na zona de ligação ao canto no perfil B (sanca).

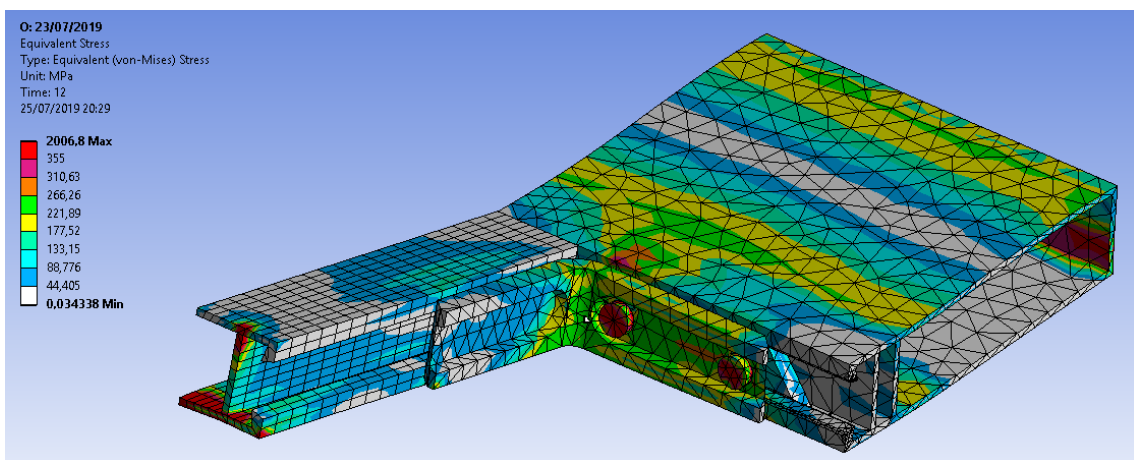


Figura 73 – Estado de tensões provete global

Na Figura 74 é visível a ligação canto fêmea e parafuso em corte. A elevada tensão do parafuso está relacionada com a pré-carga imposta no parafuso. É notório que a rotação entre perfis do nó ocorre sobretudo pela deformação da fêmea evidenciando um ponto a melhorar.

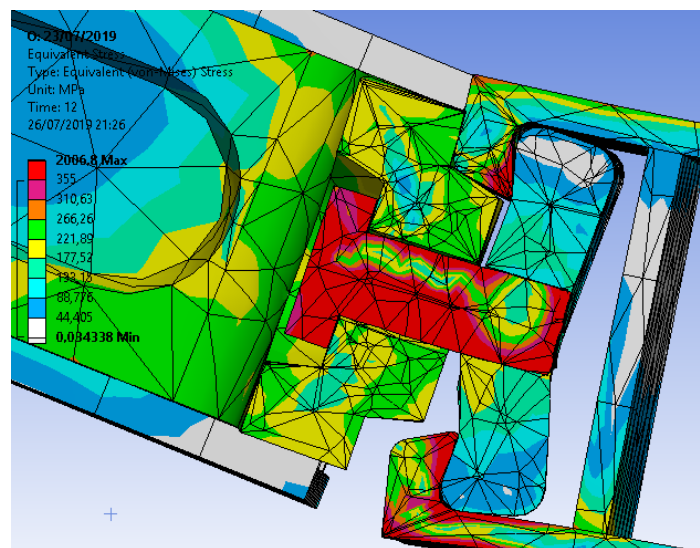


Figura 74 – Estado de tensão, vista em corte fêmea e parafuso

Na Figura 75 é possível observar as duas fêmeas, cantos e os parafusos pelo corte do perfil de sanca. Esta imagem evidencia que a simulação deve ser melhorada, uma vez que é visível que a espiga do parafuso está submetida a uma tensão superior a 500 MPa quando a fêmea apresenta tensões na secção junto ao parafuso inferiores a 195 MPa.

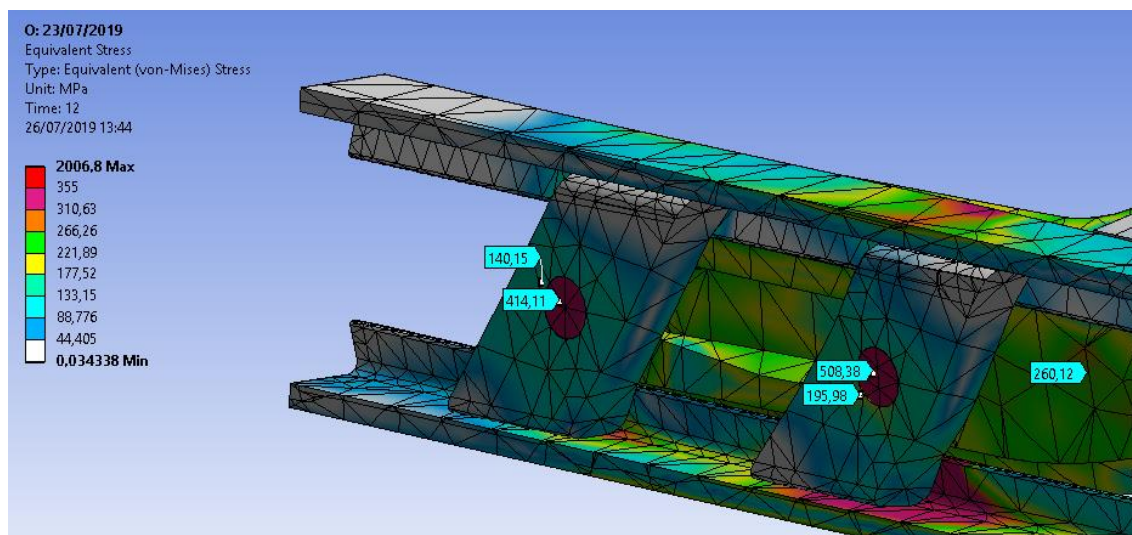


Figura 75 – Estado de tensão dos elementos

Como podemos verificar nas figuras anteriores, o perfil B sofreu uma ligeira deformação. Este fenómeno também foi verificado nos ensaios laboratoriais embora desprezível para o efeito no caso de estudo. Em relação à fêmea podemos observar que ela tem uma deformada idêntica à dos ensaios uma vez que ambas estão presentes no mesmo instante onde foi dado o início da sua rotura. No geral a deformada verificada na simulação é coerente com a verificada no ensaio.

Em relação ao estado de tensão dos elementos, como podemos observar na Figura 75 , o canto já ultrapassou o valor de tensão cedência, 260,12 MPa, junto ao local onde foi aplicado o momento.

Em relação às fêmeas, como seria previsível, os valores de tensão mais elevados foram verificados próximos dos furos. A do lado esquerdo da figura apresenta valores de tensão que ultrapassa a tensão de cedência, 140,15 MPa, e a do lado direito apresenta valores que ultrapassam o valor a tensão de rotura, 195,98 MPa.

Nos parafusos M8 foi verificado que nenhum deles atingiu o valor da tensão de cedência do material.

Quanto aos valores da força aplicada para obter o deslocamento imposto, o valor obtido na simulação foi de 19428 N sendo que o valor de força equivalente obtido experimentalmente foi de 3690 N.

Esta discrepância de resultados é muito grande, foram verificados os dados de entrada dos valores atribuídos às propriedades mecânicas dos materiais das fêmeas e dos cantos. Não tendo sido encontrados incoerências.

Mesmo que haja alguma diferença de propriedades dos elementos face ao anunciado pelo fabricante não justificaria a diferença do valor da força registada na simulação.

Enquanto não for encontrada a razão para discrepância no valor de força aplicado no ensaio e obtido na simulação esta não pode ser validada, pese embora a coerência da deformada entre a simulação e o ensaio real ser muito grande.



# 7

## CONCLUSÕES

**7.1 Conclusões**

**7.2 Proposta de trabalhos futuros**



## 7.1 Conclusões

Tendo em conta o principal objetivo deste trabalho, este estudo permitiu dar os primeiros passos na validação de uma carroçaria com perfis do tipo *Co-Bolt* no Regulamento 66, sendo este o objetivo da CaetanoBus a longo prazo.

O ensaio preliminar da ligação teve uma grande importância nas conclusões, pois permitiu observar algo contraditório considerado inicialmente. No ensaio verificou-se que a rótula plástica ocorre no perfil B (sanca) e não na ligação aparafusada. A deformação verificada foi ao longo de todo o perfil B, assim sendo o comprimento do perfil B terá uma influência importante no comportamento da ligação. Apenas ensaiando um nó de ligação no qual o perfil B possua um comprimento muito superior, equivalente à distância entre dois montantes, seria conclusivo na possibilidade da formação de uma rótula plástica numa zona que não a ligação aparafusada.

Nos ensaios das ligações de janela podemos concluir que o sentido da aplicação do momento na ligação leva a resultados pouco diferentes devido à assimétrica do perfil B. O perfil onde é aplicado o deslocamento é muito mais rígido que os elementos da ligação. O canto deformou plasticamente e não apresentou sinais de rotura, por outro lado as fêmeas partiram sendo este o elemento mais fraco desta ligação.

Nos ensaios das ligações do tejadilho não foi possível concluir o desempenho da ligação em função do sentido do momento aplicado, pois não houve a possibilidade de efetuar o ensaio no sentido inverso. Mais uma vez foi verificado que o perfil onde é aplicado o deslocamento é muito mais rígido que os elementos da ligação. No ensaio desta ligação observou-se rotura nos cantos e nas fêmeas. Neste ensaio foi possível observar que as fêmeas tiveram uma fratura dúctil e os cantos uma fratura frágil. No global esta ligação confere uma maior resistência que a ligação da janela sendo o canto da ligação do tejadilho o elemento responsável pela diferença de resistência.

Na simulação é verificado que a deformada do provete é coerente com o verificado no ensaio. Em termos qualitativos os valores de tensão verificados nos elementos são minimamente coerentes à exceção da força aplicada ao provete para gerar o deslocamento necessário. O valor desta força foi cinco vezes superior ao verificado no ensaio. Esta discrepância de resultados poderá estar relacionada com as propriedades mecânicas dos materiais das fêmeas e dos cantos, visto que a única fonte de informação para inserir no software foi os dados fornecidas pelo fabricante. Com a simulação foi possível uma maior e melhor perceção da complexidade das simulações que contemplem uniões aparafusadas, contactos com atrito, grandes deformações e o domínio plástico dos materiais. Na generalidade a simulação foi uma etapa muito dispendiosa de tempo e os resultados retirados da simulação não foram muito satisfatórios. Esta etapa trouxe mais valias para o procedimento interno da CaetanoBus em relação a algumas práticas aplicadas na simulação deste tipo de ligações.

No cômputo geral pode-se concluir que os valores de resistência das ligações são muito baixos (aproximadamente 700 N.m) quando comparados com os valores normalmente obtidos em nós de uma superestrutura de autocarros de passageiros contruída em aço (aproximadamente 6000 N.m), embora o andamento da curva seja plana e admite um grande ângulo de rotação com valores perto do máximo, o que é um comportamento adequado para a absorção de energia. Esta observação é importante no âmbito do Regulamento 66 do ponto de vista da absorção de energia da estrutura.

É de também de concluir que o ponto fraco das ligações são as fêmeas e os cantos devendo estes serem melhorados.

## 7.2 Proposta de trabalhos futuros

Para um conhecimento mais profundo do desempenho estrutural destas ligações, sugerem-se as seguintes tarefas:

- Elaborar ensaios das ligações com um comprimento de sanca superior para verificar a influência na localização das rótulas plásticas.
- Aplicar o momento no sentido inverso na ligação do tejadilho para verificar a influência em função do sentido de rotação.
- Obter as propriedades mecânicas das fêmeas e dos cantos através de ensaios de tração.
- Aplicar extensometria elétrica nos pontos críticos dos cantos para recolher valores do estado de tensão.
- Efetuar um estudo do atrito entre elementos.
- Melhorar o modelo FEA com o objetivo de comparar com os valores experimentais
- Melhorar os cantos e as fêmeas e efetuar os ensaios com as novas soluções.

# 8

## BIBLIOGRAFIA

### 8.1 Referências Bibliográficas



## 8.1 Referências Bibliográficas

- [1] *JORGE F. JUSTO e FERNANDO J. FERREIRA, CIDEM, ISEP, “Projecto e desenvolvimento de uma superestrutura de carroçaria resistente a ensaio de capotamento”.*
- [2] *Regulamento Nº 66 da Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas (UNECE), “Prescrições uniformes aplicáveis à homologação de veículos de passageiros de grande capacidade no que se refere à resistência da superestrutura.”, 19 Agosto 2010.*
- [3] *SMTUC, “Transportes Urbanos de Coimbra - Uma realidade Centenária”, 15 de Maio de 2008.*
- [4] *BBM Scania 2015.1, Manual do Carroçador, 2015.*
- [5] *The Aluminum Association, <http://www.aluminum.org/>*
- [6] *Metals Handbook Volume 2; “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials”, American Society Materials, 2ª edição, 2002.*
- [7] *Sapa Manual de desenho, “Sucesso com perfis de alumínio”, 2009.*
- [8] *LANDOLFO, R., “Cold-formes structures, Eurocode 9-1-4. Workshop: Eurocodes – Background and Applications”, Brussels, 2008.*
- [9] *GITTER, R., “Design of aluminium structures: Selection of structural alloys. GDA Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Workshop: Eurocodes - Background and Applications”, Brussels, 2008.*
- [10] *HÖGLUND, T., TALAT, Training in Aluminium Application Technologies “Design of members”, 1999.*
- [11] *CEN, European Committee for Standardization – “Eurocode 9-1-4: Design of aluminium structures, General structural rules”.*
- [12] *I. J. Polmear, “Light Alloys - Metallurgy of the Light Metals”, Edward Arnold, 3ª Ed, 1995.*
- [13] *Efunda, <http://www.efunda.com/materials/alloys/aluminum/temper.cfm>*
- [14] *Hyspex, Tecnologia em Alumínio <http://www.hyspex.com.br>*
- [15] *InfoEscola, <http://www.infoescola.com>*

- [16] *Anicolor*, **Extrusão de Alumínio**, <https://anicolor.pt/extrusao/?a=extrusao&l=pt>
- [17] *Eurocódigo 3*, “**Projeto de estruturas de aço, Parte 1-8: Projeto de ligações**”.
- [18] *YANYAO, J.*, “**An Experimental Investigation on Frictional Properties of Bolted Joints**”, 2001.
- [19] *JOHN H. BICKFORD*, “**Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints, Non-Gasketed Joint**”, 4<sup>th</sup> edition.
- [20] *Norma NP EN 10002-1* “**Materiais Metálicos – Ensaio de Tração**”.
- [21] *TOMOTSUGU SAKAI* “**The Friction Coefficient of Fasteners**”, *Bulletin of the JSME*, Vol. 21, Nº 152, February 1978.
- [22] *INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN DEL AUTOMÓVIL, INSIA*, “**Relatório de Ensaio com Aplicação do Regulamento 66 numa Superestrutura**”, Outubro de 2017.

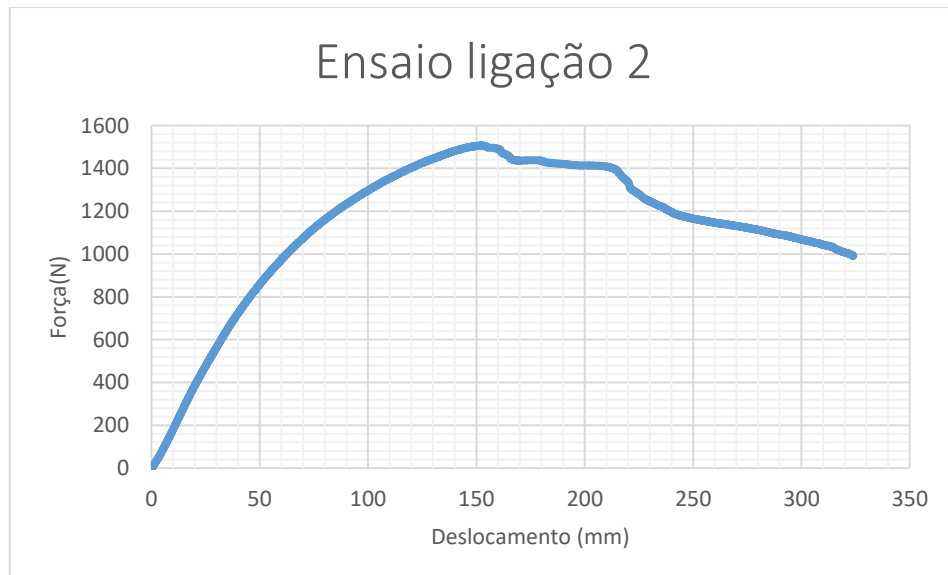
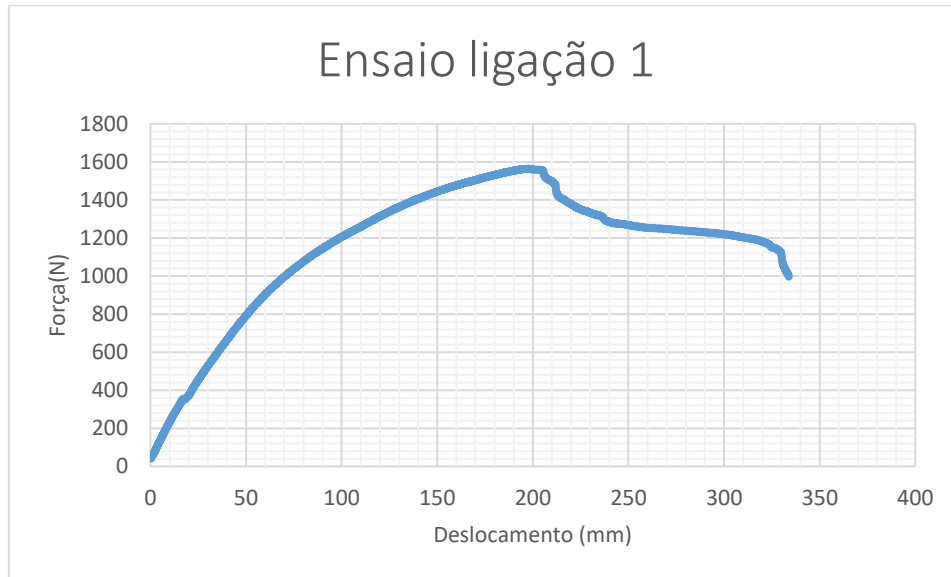
# 9

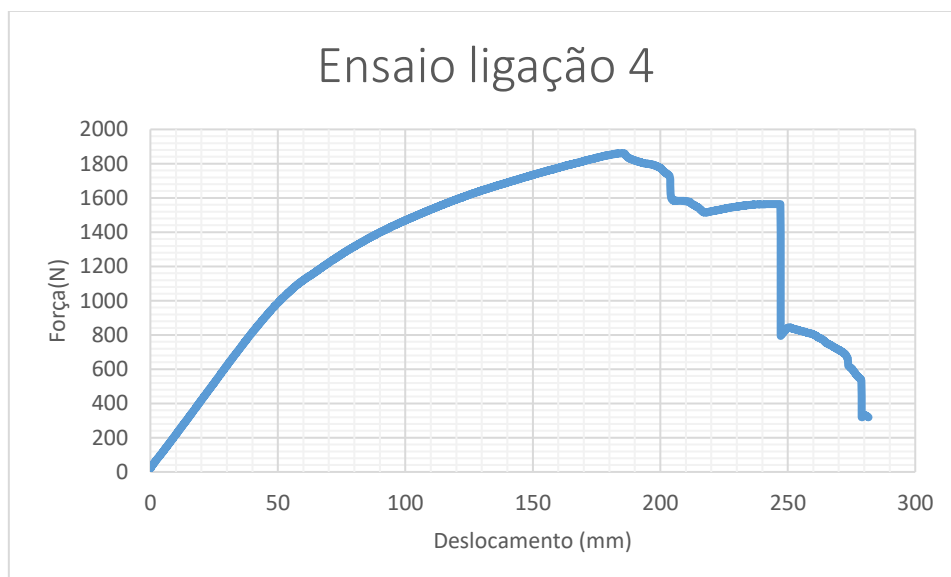
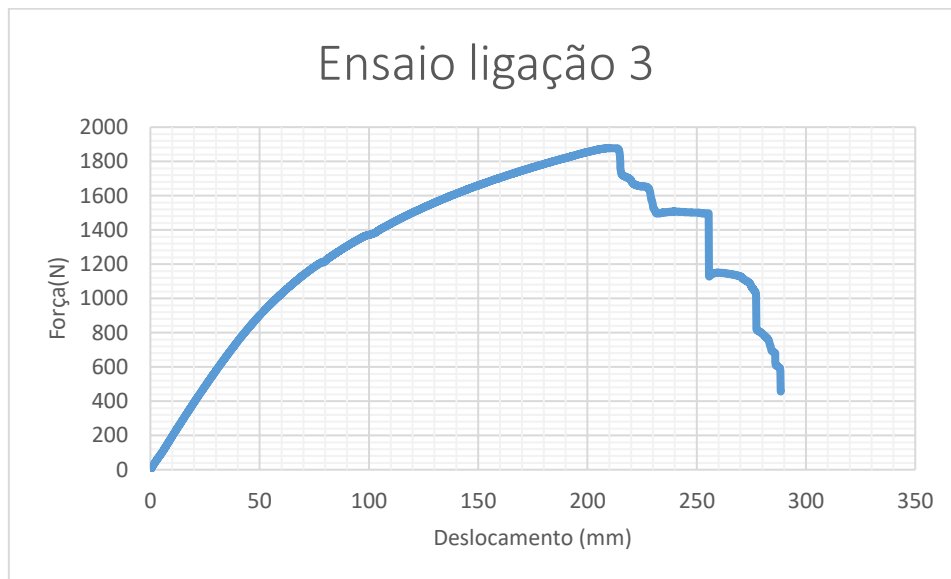
## ANEXOS

- 9.1 Gráficos dos ensaios, força vs deslocamento.
- 9.2 Desenhos técnicos



### 9.1 Gráficos dos ensaios, força vs deslocamento.





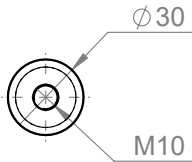
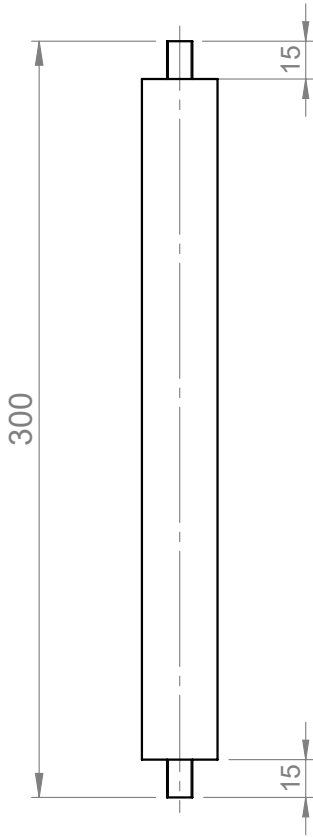
## 9.2 Desenhos técnicos.

4

3

2

1



F

E

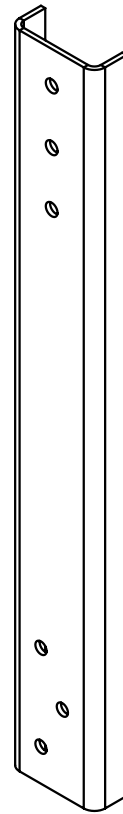
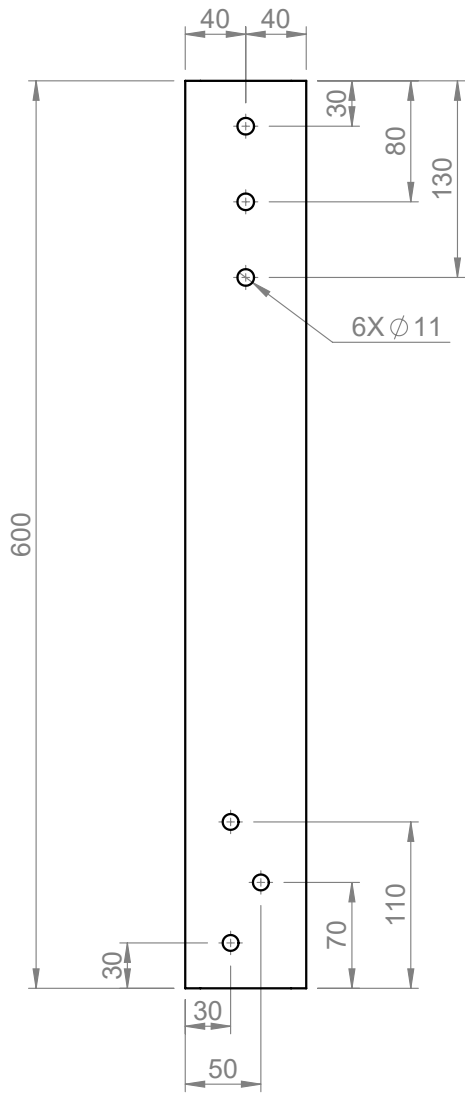
D

C

B

A

Alcance de aplicação/Range				No. Peça / Part Number	
Prot. superf./Surface Coating		Rugos./Rough.	Escala/Scale 1:3	Peso estimado/Weight	
LACADO RAL 9005		25 ✓	Material AÇO		
CAD System date: 30/07/2019		Data/Date	Nome/Name	Designação / Description  <b>ROLETO</b>	
Softw. SolidWorks		Des.	Admin		
Part . Formato/Sheet:A4		Coord.			
		Aprov. Electr. / Electr. appr.			
Construção de acordo com/Drawing According to: EN ISO 13920-A; EN ISO2768-1 m		No. Des./Drw Num.			Fol./Sheet <b>1/1</b>
Orig.		Subst./Repl.		Subst. por/Repl. by	



F

E

D

C

B

A

Alcance de aplicação/Range				No. Peça / Part Number	
Prot. superf./Surface Coating		Rugos./Rough.		Escala/Scale 1:5	
LACADO RAL 9005		25 ✓		Material	
				EN 10025-2 S355J2	
CAD System date: 30/07/2019		Data/Date	Nome/Name	Designação / Description	
Softw. SolidWorks		Des.	27-08-18 ANDRÉ		
Part .		Coord.			
Formato/Sheet:A4		Aprov. Electr. / Electr. appr.			
Construção de acordo com/Drawing According to:				SUPORTE ROLETO	
EN ISO 13920-A; EN ISO2768-1 m					
Orig.		Subst./Repl.		Fol./Sheet	
		Subst. por/Repl. by		1/1	

4

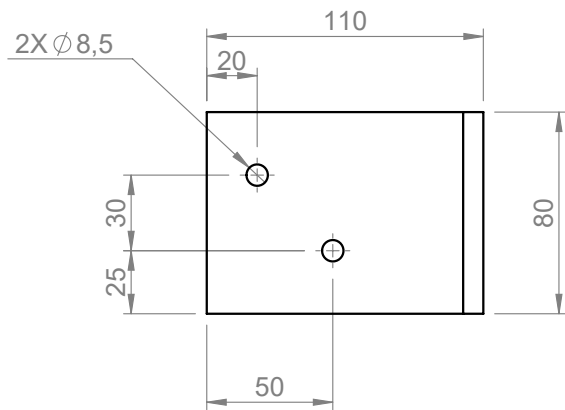
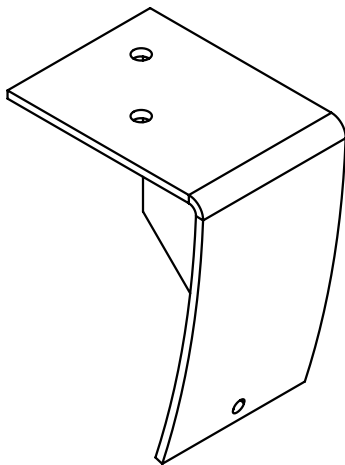
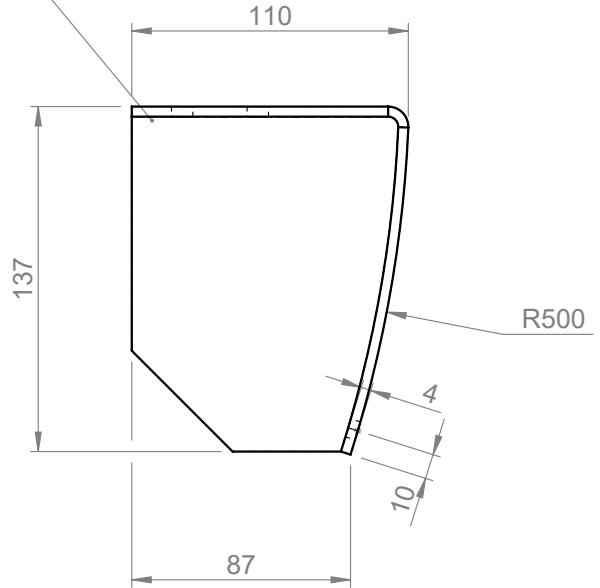
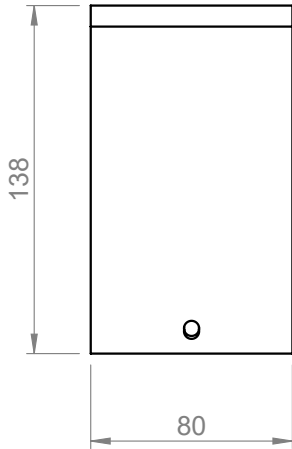
3

2

1

EN ISO 5817:D  
BS EN ISO9692-1: (135)

a4



F

E

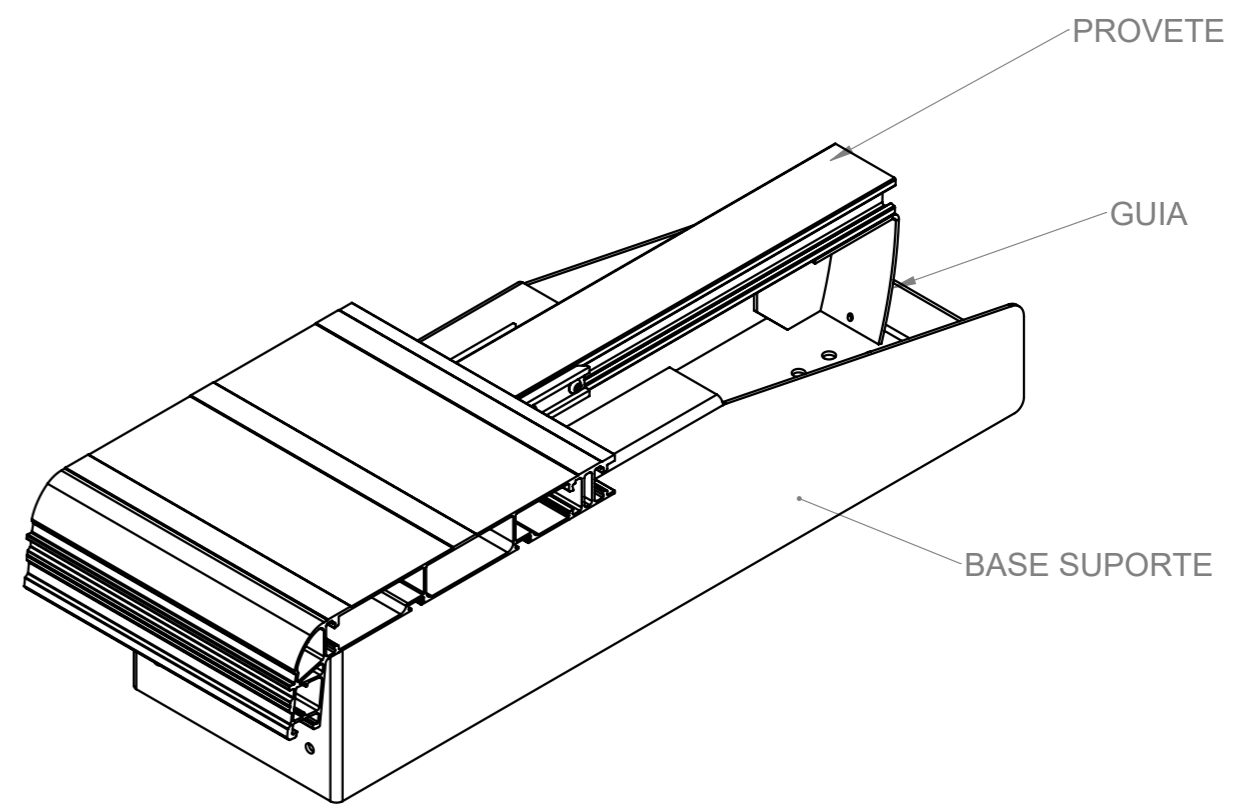
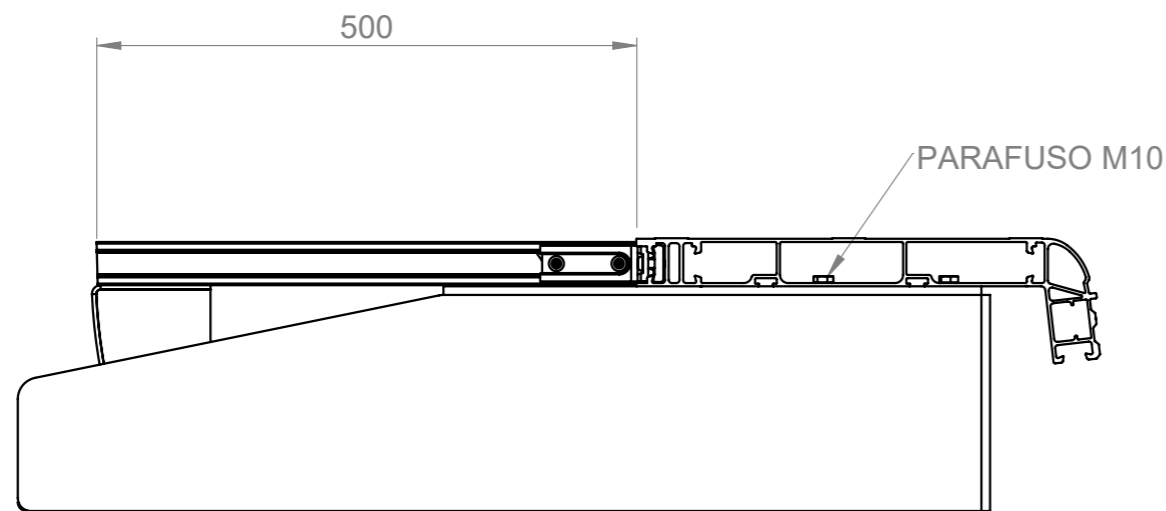
D

C

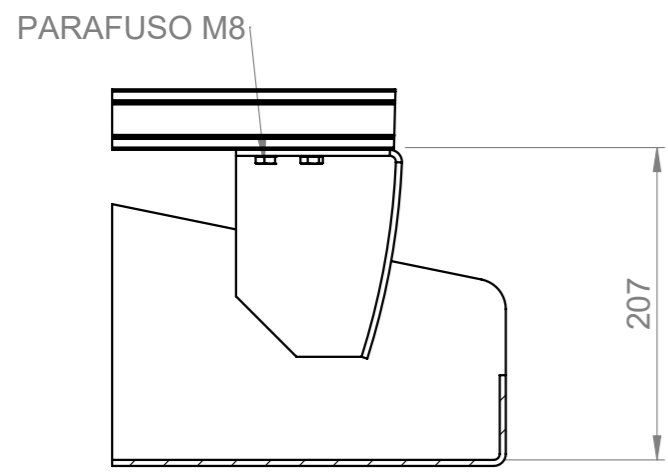
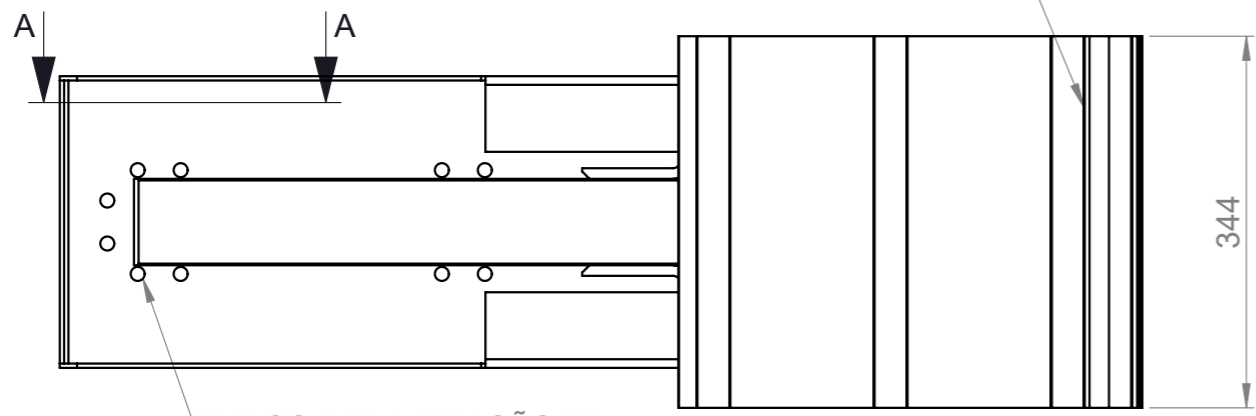
B

A

Alcance de aplicação/Range				No. Peça / Part Number	
Prot. superf./Surface Coating		Rugos./Rough.		Escala/Scale 1:3	
LACADO RAL 9005		25 ✓		Material EN 10025-2 S355J2	
CAD System date: 30/07/2019		Data/Date	Nome/Name	Designação / Description	
Softw. SolidWorks		Des.	27-08-18 ANDRÉ		
Part . Formato/Sheet:A4		Coord.			
Construção de acordo com/Drawing According to:		Aprov. Electr. / Electr. appr.		GUIA	
EN ISO 13920-A; EN ISO2768-1 m					
Orig.		Subst./Repl.		No. Des./Drw Num.	Fol./Sheet 1/1
				Subst. por/Repl. by	

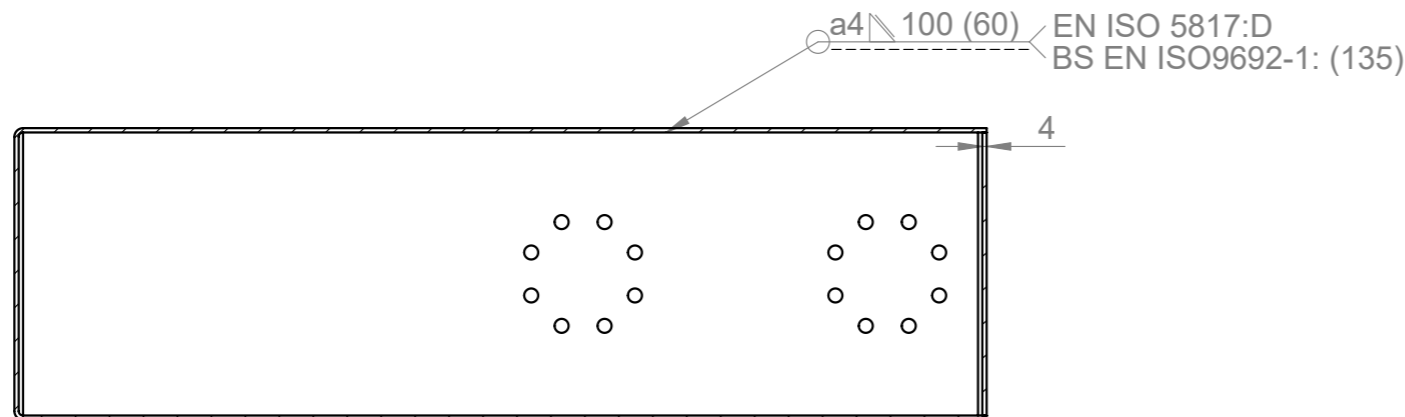
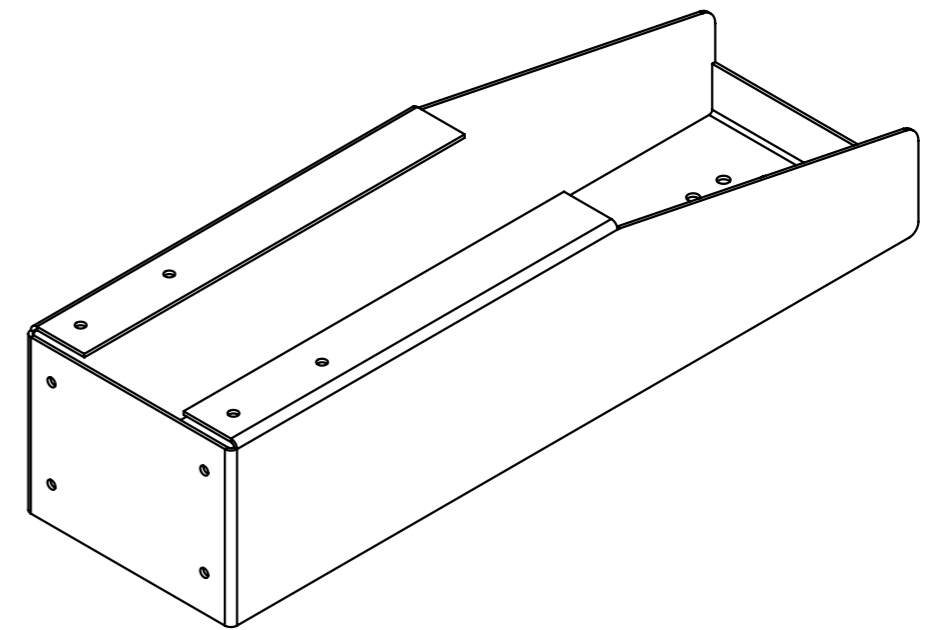
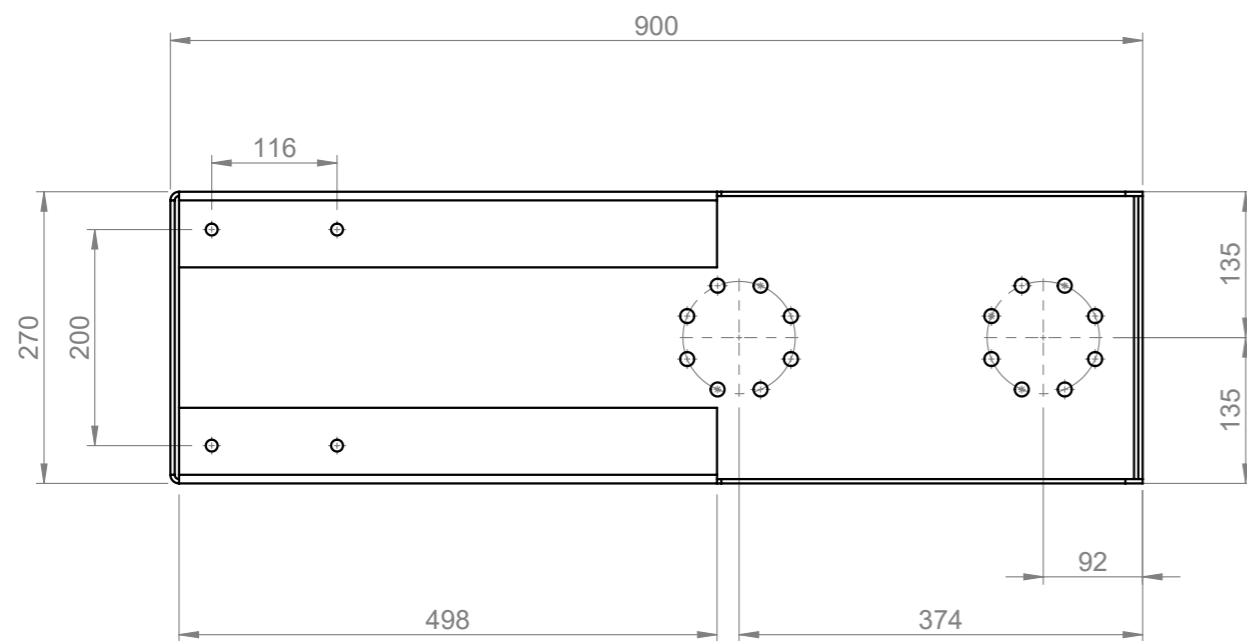
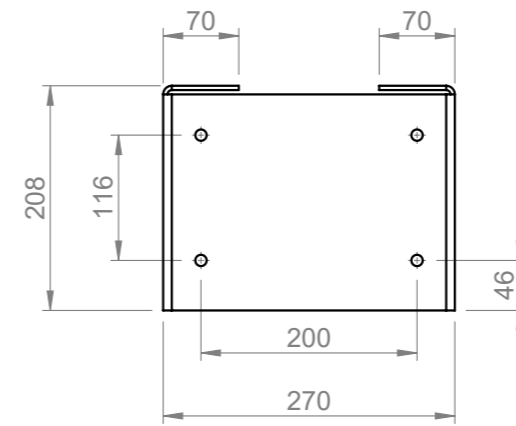
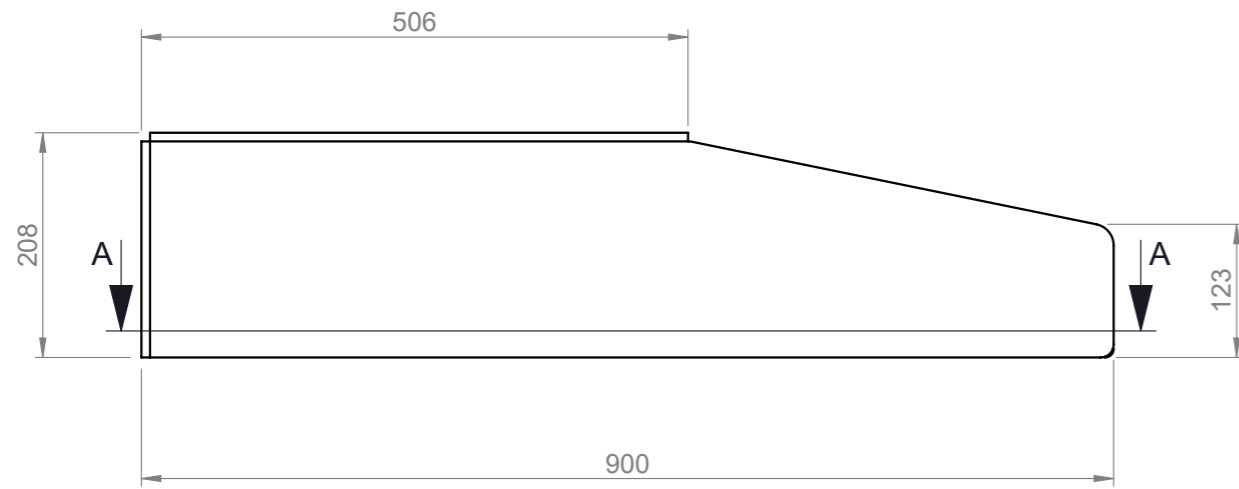


PROVETE CENTRADO PELO SUPORTE



SECÇÃO A-A  
ESCALA 1 : 5

Alcance de aplicação/Range				No. Peça / Part Number	
Prot. superf./Surface Coating		Rugos./Rough.		Escala/Scale 1:7	
		25 ✓		Material	
CAD System date: 30/07/2019		Data/Date		Designação / Description	
Softw. SolidWorks		Des. 27-08-18		ANDRÉ	
Part conjunto suporte Formato/Sheet: A3		Coord.		<p style="text-align: center;">DESENHO DE MONTAGEM DO PROVETE</p>	
Construção de acordo com/Drawing According to:		Aprov. Electr. / Electr. appr.			
EN ISO 13920-A; EN ISO2768-1 m				No. Des./Drw Num.	
Orig.				Fol./Sheet	
				1/1	
				Subst./Repl.	
				Subst. por/Repl. by	



SECÇÃO A-A

Alcance de aplicação/Range				No. Peça / Part Number	
Prot. superf./Surface Coating		Rugos./Rough.		Escala/Scale 1:7	
LACADO RAL 9005		25 ✓		Material EN 10025-2 S355J2	
CAD System date: 30/07/2019		Data/Date		Designação / Description	
Softw. <b>SolidWorks</b>		Des. 27-08-18		ANDRÉ	
Part		Coord.		Aprov. Electr. / Electr. appr.	
Formato/Sheet:A3		Construção de acordo com/Drawing According to:		No. Des./Drw Num.	
EN ISO 13920-A; EN ISO2768-1 m				Fol./Sheet <b>1/1</b>	
Orig.		Subst./Repl.		Subst. por/Repl. by	