



Aplicação dos critérios de soldadura do Eurocódigo 3 em ligações tubulares de superestruturas de um veículo pesado de passageiros

HUGO ALMEIDA COSTA

novembro de 2022

APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SOLDADURA DO EUROCÓDIGO 3 EM LIGAÇÕES TUBULARES DE SUPERESTRUTURAS DE UM VEÍCULO PESADO DE PASSAGEIROS

Hugo Almeida Costa

1171121

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SOLDADURA DO EUROCÓDIGO 3 EM LIGAÇÕES TUBULARES DE SUPERESTRUTURAS DE UM VEÍCULO PESADO DE PASSAGEIROS

Hugo Almeida Costa

1171121

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 Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto e sob a coorientação do Professor Mestre António Pedro Vitória de Pinho.

2021/2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Mestre António Pedro Vitória de Pinho

Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

Ao longo do tempo que demorou a realização desta dissertação muitos foram os momentos marcantes, variadíssimas foram as pessoas que me proporcionaram estímulo, conselho e ânimo. A todos aqueles que me acompanharam, me aconselharam e me acolheram, quero deixar um especial e reconhecido agradecimento e dizer-lhes, de forma extremamente reconhecida, obrigado, muito obrigado por tornarem este momento possível.

Porque as pessoas e as instituições têm nome, quero agradecer de forma muito particular:

- Aos meus excelentíssimos orientador e coorientador, Doutor Arnaldo Pinto e Mestre António Pinho, respetivamente, pela doura e sapiente orientação e, em simultâneo, pelo apoio constante ao longo da realização da dissertação. Para eles, o meu mais profundo obrigado;
- Ao Engenheiro Rui Fazenda e à Doutora Elza Fonseca, pela disponibilidade que sempre manifestaram em esclarecer as minhas muitas dúvidas, graciosa e despojadamente;
- À empresa CaetanoBus – Fabricação Carroçarias, S.A., por me ter proporcionado a hipótese da realização de um estágio nas suas instalações, bem como me ter recebido da melhor forma possível, agradecimento extensível a todos os colaboradores desta empresa pela forma simpática e prestável com que me acolheram;

- Ao Rafael Cunha, colaborador da CaetanoBus e amigo, que de forma abnegada me auxiliou nos ensaios práticos e me apoiou em muitos outros aspetos técnicos ao longo da feitura desta dissertação. Bem-haja meu estimado amigo;

- Aos colegas e amigos por todas as experiências vividas e pelo muito que me ajudaram, de forma direta ou indireta, durante o percurso académico. Este trabalho também é um pouco vosso.

Por fim, à minha família e, muito em particular, àqueles que quase não posso agradecer, porque é quase como agradecer a mim mesmo, aos meus queridos pais e à minha querida namorada, sem os quais nunca amaria nem seria amado como sou. Todo o amor por vocês não caberia nestas páginas. Obrigado, por estarem sempre presentes.

PALAVRAS-CHAVE

Ligações tubulares, Superestruturas, Eurocódigo 3, Soldadura, Simulação numérica, Veículo pesado de passageiros

RESUMO

A presente dissertação versa sobre a análise de ligações tubulares presentes em superestruturas de veículos pesados de passageiros, aplicando o Eurocódigo 3: Parte 1-8.

Os elementos estruturais metálicos, com secções ocas são cada vez mais utilizados na construção um pouco por todo o mundo. Estes elementos aumentam a resistência de uma estrutura levando a uma maior segurança e, por acréscimo, permitem a construção de estruturas com ótima rigidez, sendo este, um dos pontos principais.

As juntas podem estar sujeitas a vários carregamentos afetando a segurança da estrutura, acabando por reduzir a sua resistência.

Nesta investigação, pretendeu-se avaliar o desempenho de uma junta em T sujeita a dois tipos de esforços (esforço axial – tração e momento no plano).

Por conseguinte, no presente estudo, é efetuada uma análise teórica de acordo com o Eurocódigo 3, são realizados ensaios experimentais que permitem a validação dos métodos numéricos aplicados ao tema. Todos estes métodos contribuíram para alcançar o objetivo de efetuar uma otimização na junta tubular, otimização essa que consiste em entender o que influencia uma ligação soldada como a alteração do ângulo, quantidade de cordões usados, espessura a adotar e geometria a usar.

A realização desta investigação, demonstrou que alterando algumas características do cordão de soldadura e colocando os perfis tubulares de diferentes modos contribui para obter uma ligação mais resistente cerca de 40% a 60% e com validação do Eurocódigo 3.

KEYWORDS

Tubular connections, Superstructures, Eurocode 3, Welding, Numerical simulation, Heavy passenger vehicle

ABSTRACT

This dissertation is about the analysis of tubular connections present in superstructures of heavy passenger vehicles, applying the Eurocode 3: Part 1-8.

Metallic structural elements with hollow sections are increasingly used in construction all over the world. These elements increase the strength of a structure leading to greater safety and, in addition, allow the construction of structures with optimum stiffness, which is one of the main points.

Joints can be subject to various loads affecting the safety of the structure, eventually reducing its strength.

In this research, it was intended to evaluate the performance of a T-joint subjected to two types of efforts (axial effort – traction and in-plane moment).

Therefore, in this study, a theoretical analysis according to Eurocode 3 is performed, and experimental tests are carried out to allow the validation of the numerical methods applied to the subject. All these methods contributed to achieve the goal of performing an optimization in the tubular joint, optimization that consists in understanding what influences a welded connection such as changing the angle, amount of welds used, thickness to be adopted and geometry to be used.

This research showed that changing some characteristics of the weld bead and placing the tubular profiles in different ways helps to obtain a stronger connection about 40% to 60% and with validation of Eurocode 3.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CHS	<i>Circular Hollow Sections</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EF	Elementos Finitos
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
RHS	<i>Rectangular Hollow Sections</i>
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>

Lista de Unidades

A	Ampere
J	Joule
K	Kelvin
kg	Quilograma
m	Metro
mm	Milímetro

MPa	Megapascal
V	Volt
°C	Grau Celsius

Lista de Símbolos

a	Espessura efetiva de um cordão de ângulo
A	Extensão após rotura
b_i	Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento tipo RHS i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
b_{eff}	Largura efetiva da ligação de um elemento diagonal a uma corda
$b_{e,p}$	Largura efetiva para a resistência ao punçoamento
d_i	Diâmetro total do elemento de CHS i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
E	Módulo de elasticidade
f_b	Resistência à encurvadura da parede lateral da corda
$f_{vw,d}$	Valor do cálculo da resistência ao corte da soldadura
f_u	Tensão de rotura do elemento
f_{yi}	Tensão de cedência do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$F_{w,Ed}$	Valor do cálculo do esforço atuante na soldadura por unidade de comprimento
$F_{w,Rd}$	Valor do cálculo da resistência da soldadura por unidade de comprimento
g	Afastamento entre elementos diagonais numa junta em K ou em N
G	Módulo de corte
h_i	Altura total no plano da secção transversal do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)

	3)
i	Inteiro utilizado como índice para designar um elemento de uma junta, $i = 0$ designa uma corda e $j=1,2$ ou 3 os elementos diagonais
k	Fator definido no quadro apropriado, com índice g, m, n ou p
$M_{ip,i,Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor no plano do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$M_{ip,i,Rd}$	Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do momento fletor atuante no plano do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$M_{op,i,Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor no plano perpendicular ao eixo do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$M_{op,i,Rd}$	Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do momento fletor atuante no plano perpendicular ao eixo do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$N_{i,Ed}$	Valor de cálculo do esforço normal atuante no elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$N_{i,Rd}$	Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos de esforço normal atuante no elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$W_{el,i}$	Módulo de flexão elástica da secção do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
$W_{pl,i}$	Módulo de flexão plástica da secção do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
t_i	Espessura da parede do elemento i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
α	Coeficiente de expansão térmica
θ_i	Ângulo (agudo) interno entre o elemento diagonal i e a corda i ($i=0, 1, 2$ ou 3)
ν	Coeficiente de <i>Poisson</i>
η	Relação entre a altura do elemento diagonal e o diâmetro ou a largura da corda
β	Relação entre a largura ou o diâmetro médio dos elementos

	diagonais e a corda
β_w	Fator de correlação
γ_{Mw}	Coeficiente parcial de segurança para ligações
λ	Coeficiente de sobreposição

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-Estrutura em alumínio de um modelo de autocarro da CaetanoBus.....	12
Figura 2-Estrutura em aço de um modelo de autocarro da CaetanoBus (Exemplo 1)	13
Figura 3-Estrutura em aço de um modelo de autocarro da CaetanoBus (Exemplo 2)	13
Figura 4-Modelo CAD de ligações soldadas de uma superestrutura.....	15
Figura 5-Diagrama esquemático do processo de soldadura semiautomática MIG-MAG [27]	21
Figura 6-Circuito do processo de soldadura MIG-MAG [28]	21
Figura 7-Relação entre o diâmetro do fio, intensidade de corrente e velocidade de alimentação do arame no processo MIG-MAG [30]	26
Figura 8-Impacto da simulação sobre a rentabilidade do produto [48]	42
Figura 9-Ensaio feito por simulação numérica a parte lateral de um veículo pesado de passageiros [52]	43
Figura 10-Ensaio feito por simulação numérica a uma ligação da estrutura de um veículo pesado de passageiros [52]	43
Figura 11-Junta em T modelada em CAD	45
Figura 12-Junta em T fabricada	45
Figura 13-Instalações da CaetanoBus.....	50
Figura 14-Atribuição dos materiais aos perfis tubulares.....	63
Figura 15-Geometria em cascas	64
Figura 16-Tensão de von Mises em função do número de elementos de malha.....	66
Figura 17-Deslocamento em função do número de elementos de malha	66
Figura 18-Detalhes da malha	67
Figura 19-Detalhes do <i>Body Sizing</i>	67
Figura 20-Malha gerada	68
Figura 21-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo em estudo	69
Figura 22-Pormenor da zona de ligação (Escala Real 1.0x)	70
Figura 23-Pormenor da zona de ligação (Escala Automática 54.0x)	70
Figura 24-Tensão [MPa]	70
Figura 25-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo em estudo	70

Figura 26-Pormenor da zona de ligação (Escala Real 1.0x)	71
Figura 27-Pormenor da zona de ligação (Escala Automática 16.0x)	71
Figura 28-Tensão [MPa]	71
Figura 29-Ferramenta para ensaio de tração em vista explodida legendada	72
Figura 30-Simulação da ferramenta de tração [MPa]	72
Figura 31-Ferramenta para ensaio de flexão em vista explodida legendada	73
Figura 32-Simulação da ferramenta de flexão [MPa]	74
Figura 33-Ferramenta para ensaio de tração	74
Figura 34-Ferramenta para ensaio de flexão	74
Figura 35-Máquina de corte	75
Figura 36-Junta em T fabricada para ensaios	75
Figura 37-Lixas de granulometria	76
Figura 38-Desbaste da zona a instrumentar	76
Figura 39-Desbaste concluído	77
Figura 40-Local exato para aplicação do extensómetro	77
Figura 41-Extensómetro colocado em uma placa de vidro	77
Figura 42-Extensómetro colado e marcado em uma placa de vidro	77
Figura 43-Processo de colagem do extensómetro (Descolagem da fita-cola e aplicação de cola)	78
Figura 44-Processo de colagem do extensómetro (Pressão)	78
Figura 45-Extensómetro aplicado na junta	78
Figura 46-Estanhagem dos fios elétricos	79
Figura 47-Estanhagem dos terminais do extensómetro	79
Figura 48-Solda entre os fios e o extensómetro	80
Figura 49-Extensómetro aplicado com fios elétricos	80
Figura 50-Extensómetro isolado e finalizado	80
Figura 51-Conexão fios elétricos ao módulo NI 9235	81
Figura 52-Uso computacional para ligar extensómetros	81
Figura 53-Ligação desde a junta até ao computador	81
Figura 54-Ensaio de tração	82

Figura 55-Ensaio de tração (Vista aproximada).....	82
Figura 56-Força vs Deslocamento (Ensaio de tração com junta instrumentada).....	83
Figura 57-Extensómetro 0 (Tensão vs Tempo).....	83
Figura 58-Extensómetro 1 (Tensão vs Tempo).....	83
Figura 59-Zona de rotura (Ensaio de tração).....	84
Figura 60-União soldada com fissura (Ensaio de tração)	84
Figura 61-Ensaio de flexão de junta sem instrumentação	85
Figura 62-Ensaio de flexão de junta com instrumentação	85
Figura 63-Força vs Deslocamento (Ensaio de flexão com junta não instrumentada)	85
Figura 64-Junta após ensaio (Ensaio de flexão com junta não instrumentada	86
Figura 65-Fissura pormenorizada (Ensaio de flexão com junta não instrumentada).....	86
Figura 66-Força vs Deslocamento (Ensaio de flexão com junta instrumentada)	86
Figura 67-Extensómetro 1 (Tensão vs Tempo).....	87
Figura 68-Extensómetro 2 (Tensão vs Tempo).....	87
Figura 69-Extensómetro 1 (Simulado no <i>software Ansys</i>) [MPa].....	88
Figura 70-Extensómetro 2 (Simulado no <i>software Ansys</i>) [MPa].....	88
Figura 71- Junta após ensaio (Ensaio de flexão com junta instrumentada).....	89
Figura 72-Fissura obtida durante o ensaio (Ensaio de flexão com junta instrumentada).....	89
Figura 73-Ponto usado para retirar os valores das tensões da simulação numérica	90
Figura 74-Variação da tensão de von Mises num ponto da ligação suportando um esfoço de tração.....	91
Figura 75-Variação da tensão de von Mises num ponto da ligação suportando um esfoço de flexão	91
Figura 76-Junta com 2 cordões de soldadura.....	92
Figura 77-Junta com 4 cordões de soldadura.....	92
Figura 78-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com melhoria (Escala Real 1.0x) [MPa].....	103
Figura 79-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com melhoria (Escala Automática 58.0x) [MPa]	103
Figura 80-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com melhoria (Escala Real 1.0x) [MPa].....	104
Figura 81-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com melhoria (Escala Automática 13.0x) [MPa]	104

Figura 82-Reforço para junta modelado em CAD (Vista 1)	105
Figura 83-Reforço para junta modelado em CAD (Vista 2)	105
Figura 84-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com reforço (Escala Real 1.0x) [MPa].....	105
Figura 85-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com reforço (Escala Automática 69.0x) [MPa]	105
Figura 86-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com reforço (tensão no reforço) (Escala Real 1.0x) [MPa]	106
Figura 87-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (Escala Real 1.0x) [MPa].....	106
Figura 88-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (Escala Automática 22.0x) [MPa]	106
Figura 89-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (tensão no reforço) (Escala Real 1.0x) [MPa].....	107
Figura 90-Indicação dos pontos em análise para junta com melhoria	108
Figura 91-Indicação dos pontos em análise para junta com reforço	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Informações da empresa [4]	7
Tabela 2-Composição química do aço S355J2H [18]	16
Tabela 3-Propriedades gerais do aço S355H (Simbologia de acordo com Eurocódigo 3) [19][20][21]	17
Tabela 4-Valor máximo permitido de espessura do elemento para o aço S355 [23]	18
Tabela 5-Processos de soldadura por fusão e suas características [26]	19
Tabela 6-Campos de aplicação dos gases e misturas gasosas de proteção na soldadura MIG-MAG [24]	22
Tabela 7-Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG [24]	23
Tabela 8-Parâmetros do processo [24]	24
Tabela 9-Parte 1 do Eurocódigo 3 [42]	29
Tabela 10-Modos de rotura para juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS	31
Tabela 11-Método simplificado para o cálculo da resistência do cordão de ângulo (Expressões)	34
Tabela 12-Domínio de validade de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS	35
Tabela 13-Lengenda dos parâmetros	35
Tabela 14-Condições suplementares para juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS	36
Tabela 15-Valores de cálculo do esforço normal resistente de juntas soldadas em T, X e Y entre elementos diagonais RHS e cordas RHS	37
Tabela 16-Informação complementar para o cálculo do esforço normal resistente de juntas soldadas em T, X e Y entre elementos diagonais RHS e cordas RHS	38
Tabela 17-Valores de cálculo da resistência à flexão de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS (Momentos no plano)	39
Tabela 18-Valores de cálculo da resistência à flexão de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS (Momentos fora do plano)	40
Tabela 19-Parâmetros complementares para as tabelas anteriores	41
Tabela 20-Estudos realizados através de simulação numérica	44
Tabela 21-Autocarros da CaetanoBus [4]	51
Tabela 22-Composição química do fio [60]	53
Tabela 23-Dimensões da junta tubular	54

Tabela 24-Valores para validação da junta em estudo	55
Tabela 25-Valores para validação das condições suplementares da junta em estudo	56
Tabela 26-Considerações à tração	56
Tabela 27-Dimensão do cordão e fatores do aço S355	62
Tabela 28-Esforços da junta em estudo por unidade de comprimento	63
Tabela 29-Dados para convergência da malha	65
Tabela 30-Malha adotada para simulações a efetuar	67
Tabela 31-Condições fronteira para simulação	68
Tabela 32-Diferença entre tensão do ensaio experimental e tensão do ensaio numérico	88
Tabela 33-Diferença do ângulo de soldadura numa ligação suportando esforço de tração	90
Tabela 34-Diferença do ângulo de soldadura numa ligação suportando esforço de flexão	91
Tabela 35-Comparação da tensão instalada no uso de 2 cordões ou 4 cordões na união soldada sofrendo esforços de tração [Tensão de von Mises]	93
Tabela 36-Comparação da tensão instalada no uso de 2 cordões ou 4 cordões na união soldada sofrendo esforços de flexão [Tensão de von Mises]	93
Tabela 37-Valores da tensão com alteração da espessura efetiva do ângulo de soldadura sofrendo esforço de tração [Tensão de von Mises]	94
Tabela 38-Valores da tensão com alteração da espessura efetiva do ângulo de soldadura sofrendo esforço de flexão [Tensão de von Mises]	95
Tabela 39-Comparação do uso de perfis com larguras iguais e diferentes	96
Tabela 40-Junta tubular com 2 perfis de secção 40x40x2 [mm] sofrendo diferentes esforços	97
Tabela 41-Junta tubular com perfil 40x40x3 [mm] e com perfil 50x50x3 [mm] sofrendo diferentes esforços	98
Tabela 42-Dimensões da junta tubular melhorada	100
Tabela 43-Valores para a validação da junta melhorada	101
Tabela 44-Parâmetros necessários para a junta tubular melhorada	101
Tabela 45-Valores calculados dos esforços da junta tubular melhorada	102
Tabela 46-Esforços da junta melhorada por unidade de comprimento	103
Tabela 47-Diferenças entre junta sem melhorias e junta com melhorias	107
Tabela 48-Resultados obtidos para a junta com melhoria suportando esforço de tração	109
Tabela 49-Resultados obtidos para a junta com melhoria suportando esforço de flexão	110

Tabela 50-Resultados obtidos para a junta com reforço suportando esforço de tração	111
Tabela 51-Resultados obtidos para a junta com reforço suportando esforço de flexão	113

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Metodologia	5
1.4	Estrutura da dissertação	6
1.5	Empresa de acolhimento	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	Superestruturas.....	11
2.2	Materiais e Processos.....	15
2.2.1	Materiais	15
2.2.1.1	Aço S355J2H.....	16
2.2.2	Soldadura	18
2.2.2.1	Classificação da soldadura	19
2.2.2.2	Soldadura semiautomática (MIG-MAG).....	20
2.2.2.2.1	Princípios do processo e equipamento necessário	20
2.2.2.2.2	Gases e misturas gasosas de proteção na soldadura pelo processo MIG-MAG	22
2.2.2.2.3	Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG	23
2.2.2.2.4	Parâmetros do processo	24
2.2.2.2.5	Vantagens e desvantagens e suas aplicações	27
2.2.2.3	Soldadura do S355J2H	27
2.3	Eurocódigo 3	28
2.3.1	Regulamento	29
2.3.2	Princípio para o dimensionamento segundo o Eurocódigo 3	30

2.3.3	Estudo de um dos casos do Eurocódigo 3	34
2.3.3.1	Caso de estudo.....	36
2.4	Simulação Numérica	41
3	DESENVOLVIMENTO	49
3.1	Caraterização da empresa.....	49
3.1.1	Apresentação do Grupo Salvador Caetano	49
3.1.2	Apresentação da CaetanoBus	50
3.2	Materiais, métodos e resultados	53
3.2.1	Materiais	53
3.2.2	Método analítico do caso de estudo	53
3.2.3	Simulação do caso de estudo	63
3.2.3.1	Condições de análise numérica	63
3.2.3.2	Análise numérica do caso de estudo	69
3.2.4	Método experimental do caso de estudo	71
3.2.4.1	Procedimento experimental.....	71
3.2.4.2	Ensaio de tração.....	82
3.2.4.3	Ensaio de flexão	84
3.3	Análise e discussão de parâmetros que influenciam a ligação	89
3.4	Propostas de melhoria construtiva	99
3.4.1	Junta tubular em estudo com resultados adquiridos implementados.....	99
3.4.2	Junta tubular em estudo com reforço.....	104
3.4.3	Apresentação de resultados das melhorias construtivas	107
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	117
4.1	Conclusões	117
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	119
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	123

6	ANEXOS.....	131
6.1	Desenhos das ferramentas para ensaios	131

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura da dissertação

1.5 Empresa de acolhimento

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A mobilidade assume-se, na atualidade, como um fator estruturante no desenvolvimento das diferentes sociedades humanas, configurando-se o setor dos transportes como um dos sustentáculos desse desenvolvimento. No entanto, o desenvolvimento e o progresso deste setor (ou de outro qualquer) tem de apostar na sustentabilidade e devem estar cada vez mais presentes nas políticas e estratégias territoriais. Sabemos que o setor dos transportes, no seu todo, sempre representou e, ainda continua a representar, um problema ambiental significativo.

Urge, cada vez com mais premência, adotar um conjunto de políticas e estratégias que possam mitigar os vários problemas ambientais relacionados com o setor dos transportes e procurar soluções de mobilidade mais sustentáveis. Na realidade, é necessário diminuir as emissões de gases, particularmente aqueles que mais contribuem de forma danosa para o ambiente, particularmente as diferentes formas de poluição atmosférica, como são exemplo o efeito de estufa e as chuvas ácidas, para citar algumas das mais mediáticas.

Por toda a Europa, particularmente na última década, assistimos a um grande investimento na rede de transportes públicos. Há, com efeito, uma procura crescente em proporcionar uma “mobilidade sustentável”, oferecendo modalidades de transporte público que promovam padrões de mobilidade mais amigos do ambiente. É, igualmente uma forma de educar para novas mobilidades. Mobilidades que passem, em primeira instância, pela diminuição da utilização dos transportes individuais e pelo incremento dos denominados transportes públicos, mesmo sabendo que muitas dessas mudanças passam por alterações nos comportamentos individuais e coletivos dos cidadãos, ou seja, de todos nós.

De forma a quebrar resistências, que sempre surgem, às mudanças, em que frequentemente as tendências vão no sentido do aumento da taxa de motorização da população, do aumento do número de viagens a par da crescente diversificação dos

seus motivos e da consequente exigência de flexibilidade nas deslocações diárias, verifica-se na procura da alteração de mentalidades, no que se refere ao uso do transporte individual, um forte avanço tecnológico nos últimos anos que apresenta formas de mobilidade com baixas ou até nulas emissões, isto é, veículos elétricos ou híbridos.

É incomensurável o conjunto de vantagens que estes últimos apresentam comparativamente aos veículos de combustão. Na realidade, para além da diminuição significativa das emissões, são mais silenciosos e conseguem atingir um número menor de manutenções no seu ciclo de vida, comparativamente aos veículos de combustão.

A expansão destas tecnologias mais “amigas” do ambiente ainda enfermam de algumas limitações que limitam a sua maior generalização. Essas limitações ou obstáculos a uma maior aceitação e generalização passam, em grande escala, aos tempos de carregamento das baterias (pese as melhorias significativas que ano após ano têm sido introduzidas) nos veículos elétricos e a uma rede pouco significativa, em número e dispersão espacial de postos de abastecimento de hidrogénio para veículos movidos a hidrogénio.

Deste modo, para que se possa expandir o mercado de forma relevante, tem existido uma procura constante de novos materiais, de novas tecnologias, e de melhoramento de estruturas, para reduzir o peso, melhorar a aerodinâmica e para elevar o nível de segurança.

Com efeito, além da proteção ambiental, a segurança dos passageiros é um ponto muito importante, visto que tem havido um aumento da taxa de acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros, com consequências nefastas para os seus ocupantes, evidenciando-se deste modo a importância da segurança passiva (tudo o que tem por objetivo minimizar os danos e proteger os utilizadores em caso de acidente) [1].

Para os países pertencentes à União Europeia, a homologação de um veículo pesado de passageiros tem obrigatoriamente de estar na posse de uma certificação da resistência da superestrutura em caso de capotamento, efetivada de acordo com o regulamento UNECE R66 [2].

Como já foi referido anteriormente, o objetivo para os próximos anos é continuar na busca de materiais mais leves, atingir metas cada vez mais baixas de emissões, não comprometendo a resistência da estrutura, sendo este último aspeto um fator essencial.

Neste contexto, é importante toda a denominada superestrutura ser o mais resistente possível como forma de poder suportar o maior número de esforços e tensões. É, precisamente neste âmbito e, nesta perspetiva, que o estudo das ligações entre tubos usados na construção da superestrutura é crucial.

É, igualmente, na forte convicção do papel primordial e imperativo que assume as ligações entre tubos, na construção da superestrutura, que irá assentar o tema central desta dissertação.

1.2 Objetivos

Com base no propósito central desta dissertação, esta terá como objetivo a análise das ligações entre tubos de secção quadrangular ou retangular de acordo com o Eurocódigo 3 e obter propostas de soluções de melhoria construtiva, com o intuito de se absorver mais energia de deformação e por forma a diminuir as tensões máximas instaladas, através de análises numéricas, pelo método de Elementos Finitos. Estas análises numéricas terão de ser validadas segundo uma comparação a resultados obtidos de um ensaio prático.

O objetivo final será a obtenção de uma ligação soldada otimizada, obtendo um maior conhecimento, relativamente a aspetos técnicos que podem influenciar (como a influência da espessura de tubos e de cordões de soldadura), conseguindo melhorar o desempenho das ligações e aumentando a sua resistência.

1.3 Metodologia

A metodologia adotada para a elaboração da presente dissertação baseou-se na pesquisa bibliográfica sobre temas relacionados com o comportamento das ligações soldadas quando submetidas a esforços. Foi efetuado um estudo teórico das características do aço em análise, um estudo teórico das características da soldadura, dando importância principal ao processo de soldadura MIG-MAG. Após este estudo inicial, foi realizada uma pesquisa sobre as ligações tubulares, começando também por estabelecer uma estratégia de investigação e de solução recorrendo ao Eurocódigo 3. Foi efetuado um estudo numérico por Método de Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS 2020 R2 [3], sendo que, posteriormente, foram realizados ensaios experimentais, possibilitando deste modo, a validação e afinação do modelo de elementos finitos. Por último, realizou-se a redação da presente dissertação.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por quatro capítulos, nomeadamente:

1. Introdução;
2. Revisão bibliográfica;
3. Desenvolvimento;
4. Conclusões.

No Capítulo 1 é realizada uma breve apresentação da dissertação abordando-se o enquadramento, os objetivos pretendidos, a metodologia e empresa de acolhimento.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, onde serão abordados conceitos fundamentais para o desenvolvimento da dissertação, como o aço em estudo, o processo de soldadura usado, a importância das ligações soldadas, a forma como são compostos os veículos pesados de passageiros, a explicação do Eurocódigo 3, bem como a sua aplicação no caso de estudo desta dissertação. Por fim, apresenta-se um subcapítulo de simulação numérica.

No Capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento, desde materiais utilizados em todos os métodos que foram usados, isto é, método analítico onde se insere o Eurocódigo 3, método de simulação numérica e ainda o método experimental, com o intuito de efetuar análises e conseguir obter uma proposta de melhoria do caso de estudo.

No Capítulo 4 apresenta-se as conclusões da pesquisa efetuada e de todo o trabalho prático desenvolvido nesta dissertação.

A pesquisa bibliográfica contém informação recolhida de livros, artigos e trabalhos realizados no âmbito das ligações soldadas, materiais de construção e soldadura. Inclui estudos realizados por diferentes autores e as principais conclusões daí resultantes.

1.5 Empresa de acolhimento

O presente estudo foi proposto pela empresa CaetanoBus – Fabricação Carroçarias, S.A., situada no concelho de Vila Nova de Gaia.

Os produtos desta empresa são na sua maioria para exportação e a sua atividade principal é a produção de carroçarias para posterior carroçamento. Atualmente a empresa para além de carroçarias também produz o seu próprio chassi, para posterior

aplicação em veículos do tipo urbano. A Tabela 1 apresenta algumas informações da organização, nomeadamente localização e horário de funcionamento. Salientar que no subcapítulo 3.1 é apresentado uma caracterização da empresa.

Tabela 1-Informações da empresa [4]

Nome da empresa	CaetanoBus-Fabricação Carroçarias, S.A.
Morada	Av. Vasco da Gama 1410, 4430-247-Vila Nova de Gaia PORTUGAL
Horário de funcionamento	8:30-18:00 (Segunda a Sexta)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Superestruturas

2.2 Materiais e Processos

2.3 Eurocódigo 3

2.4 Simulação Numérica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Superestruturas

Uma superestrutura está presente em diversos setores de trabalho, nomeadamente em engenharia naval, engenharia civil e engenharia mecânica. Existem diversos estudos efetuados sobre superestruturas, entre os quais destacamos a título meramente exemplificativo os seguintes:

- como caracterização de forças induzidas por impacto e danos a superestruturas de pontes [5];
- como análise de propriedades mecânicas de um modelo similar do navio da marinha com uma superestrutura composta por sanduíche integrada [6].

Intitula-se por superestrutura parte de uma construção que esteja acima do nível do solo [7]. Tomando como exemplo uma carroçaria de um veículo pesado de passageiros, temos o chassi, que pode ser definido por infraestrutura, visto que está ao nível do solo. Acoplado ao referido chassi temos a estrutura do veículo, na qual o carroçador designa por “gaiola”.

Existem vários tipos de estrutura, dependendo do objetivo, contudo podemos mencionar as superestruturas em alumínio e em aço. A Figura 1 representa o chassi e a estrutura de um modelo de autocarro da CaetanoBus.



Figura 1-Estrutura em alumínio de um modelo de autocarro da CaetanoBus

Este tipo de estruturas em alumínio é aplicado em veículos pesados de passageiros, particularmente aos de mobilidade elétrica ou de mobilidade a hidrogénio. O objetivo é múltiplo e pretende, entre outros aspetos:

- permitir uma redução de peso e de consumo de combustível;
- obter uma maior eficiência energética e menores emissões de carbono;
- obter uma maior resistência à corrosão.

É importante, igualmente, destacar que em caso de colisão, existe uma maior facilidade na substituição de painéis. Para atingir todos estes objetivos, o material utilizado nestas estruturas é o AW 6106-T6, visto ser uma liga de alumínio que fornece uma combinação ideal de propriedades mecânicas, complexidade de forma, boa resistência e uma boa soldabilidade.

Há, contudo, a referir que as ligas de alumínio apresentam alguns inconvenientes em caso de ser efetuada uma soldadura, entre os quais se podem destacar:

- a formação de porosidade pelo H_2 ;
- a formação de fendas a alta temperatura e a perda de resistência mecânica do material.

Daqui resulta, concretamente em relação à soldadura, que este é um processo que não é realizado na maioria dos casos, sendo o acoplamento realizado por ligações aparafusadas.

Na verdade, as ligações aparafusadas conseguem obter um excelente potencial na sua aplicação, visto que tem uma instalação fácil e de baixo custo.

Foi realizado um estudo sobre a conexão de placas aparafusadas de um lado com rosca e estrutura interna de reforço, cujos resultados foram classificados como bons relativamente à utilização de placas, sendo estas uma mais-valia para uma estrutura suportar maiores esforços [8].

Este método é utilizado no acoplamento da superestrutura ao chassi, visto que não pode ocorrer o processo de soldadura para juntar os mesmos, segundo o manual do carroçador.

Relativamente aos inconvenientes do recurso ao processo de soldadura, exceto em casos especiais e muitos pontuais, existem variadíssimas análises efetuadas a ligações soldadas em alumínio que comprovam, inequivocamente, a redução das propriedades do material. Podemos citar o estudo efetuado pelo Tomasz, Paweł, Karol e Jarosław [9] sobre as propriedades de corrosão, estruturais e mecânicas nas juntas soldadas de duas ligas de alumínio, nomeadamente série 6000 e série 7000.

As superestruturas em aço presentes na Figura 2 e Figura 3 são aplicadas em veículos pesados de passageiros a combustão, uma vez que a prioridade nestas circunstâncias não é o peso, mas sim a maior resistência a qualquer tipo de esforços.



Figura 2-Estrutura em aço de um modelo de autocarro da CaetanoBus (Exemplo 1)



Figura 3-Estrutura em aço de um modelo de autocarro da CaetanoBus (Exemplo 2)

O uso do aço no fabrico da estrutura é mais versátil, este proporciona soluções estruturais mais resistentes.

Existe uma vasta gama de aços que podiam ser utilizados para o fabrico das estruturas, contudo a opção foi pelo uso do S355J2H, aprofundando-se outros aspetos sobre este último no subcapítulo 2.2.1.1. Com este tipo de material, o acoplamento da estrutura ao chassi é executado através de processos de soldadura.

Um artigo publicado no *Journal of Materials Engineering and Performance* [10] menciona uma série de testes efetuados a aços inoxidáveis em estruturas de veículos pesados de passageiros, nomeadamente resistência à fadiga, ao impacto e à mecânica da fratura. Observaram-se resultados interessantes quando se compara estes aços aos aços ao carbono ou às ligas de alumínio. Os aços inoxidáveis apresentaram, invariavelmente, maiores vantagens analisando os testes atrás referidos. Como aspeto menos positivo ressalve-se o facto de que o aço inoxidável apresentar um custo mais elevado, registrando, no entanto, um ciclo de vida maior.

Dado algum conhecimento sobre o acoplamento e sobre as principais características das estruturas, realça-se a importância da superestrutura no veículo pesado de passageiros. Na realidade, é nesta que é incorporada a maioria dos componentes do veículo. Acresce ao referido que é no interior da estrutura que irão aqueles que mais interessa preservar – os passageiros – cuja segurança é de prioridade máxima.

A estrutura é testada de forma a garantir que o espaço residual não seja comprometido, este espaço tem de ser preservado para aumentar a possibilidade de sobrevivência dos passageiros e do condutor em caso de capotagem. Refira-se que um dos testes fulcrais para o veículo ser homologado é obter aprovação no ensaio de capotagem. Outros ensaios que são executados para obter a homologação são os ensaios quasi-estáticos de carga de secções da carroçaria, os cálculos quasi-estáticos baseado no ensaio de componentes e a simulação informática (cálculos dinâmicos) [2].

Em suma, a estrutura é fundamental para o veículo pesado de passageiros tornando-se, deste modo, importante toda a sua configuração, desde as ligações usadas, perfis usados e todos os esforços a que são sujeitos.

Gerken [11] apresentou uma visão geral da utilização das estruturas tubulares no contexto da evolução das estruturas metálicas em geral, com destaque em construções tubulares onde conclui que perfis tubulares de secção transversal, circular, quadrada e retangular oferecem notáveis propriedades de resistência estática relacionadas à compressão, torção, flexão multiaxial e encurvadura lateral.

A Figura 4 exhibe, de uma forma mais pormenorizada, ligações típicas que podem ser encontradas numa superestrutura, nomeadamente juntas em “T”, “Y” ou “K”.

Este tipo de ligações cria uma estrutura mais resistente de modo a suportar mais esforços, mas estas são criadas através da junção dos materiais recorrendo a um processo de soldadura, sendo este mais especificado no subcapítulo 2.2.2.2

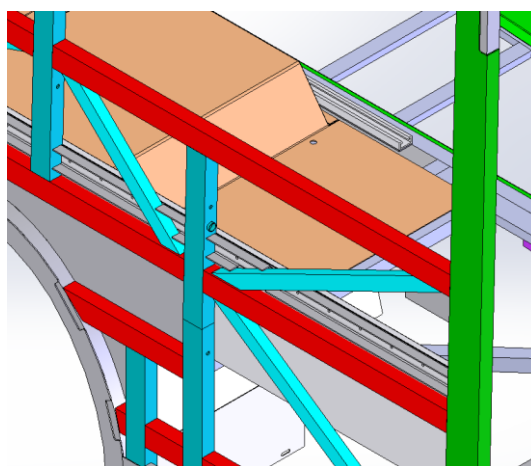


Figura 4-Modelo CAD de ligações soldadas de uma superestrutura

Shao [12] estudou o efeito de alguns parâmetros geométricos na distribuição de tensões na região da solda para ligações tubulares do tipo “K” e “T” sujeitas a carregamento axial. A distribuição da tensão ao longo do “pé” da solda é muito crítica, levando a uma diminuição da vida útil da ligação devido à fadiga. A investigação de tais efeitos geométricos pode contribuir para aumentar a vida útil de tais ligações.

Zhao [13] desenvolveu um estudo no qual conclui que o processo de soldadura pode causar deterioração, tanto na resistência, como na ductilidade, dependendo do aço, visto que existe casos onde ocorrem melhorias.

Contudo, estas ligações são necessárias para suportar os esforços, como já foi referido anteriormente, sendo que é necessário um cuidado elevado quanto à temperatura crítica aplicada na junta, visto que esta é influenciada pela razão geométrica β e pela carga aplicada, salientando que os efeitos de outros parâmetros geométricos são insignificantes [14]. Em que o β corresponde à relação entre a largura dos elementos diagonais e a corda (b_i/b_0).

2.2 Materiais e Processos

2.2.1 Materiais

Entre os materiais de construção, como é de conhecimento global, o aço tem uma posição de destaque. Combina a resistência mecânica com a disponibilidade do mesmo

e com o seu baixo custo. Acresce que é um material mais fácil de ser preparado e aplicado para o efeito desejado.

Neste contexto, é fácil compreender a importância e extensão da aplicação dos aços em todos os campos da engenharia, tal como referido no estudo de A. Kyröläinen [10] sobre o uso de aço em superestruturas.

O alumínio é outro material de construção usado em superestruturas. Confere uma multiplicidade de aplicações graças à sua leveza, à condutividade elétrica, à resistência, à corrosão e ao baixo ponto de fusão, tal como referido no estudo feito por S. Nandhakumar [15].

Por último, destaque-se, embora de aplicação reduzida nos veículos pesados de passageiros, os materiais compósitos no fabrico de superestruturas.

São materiais bastante mais onerosos comparativamente a outros materiais, o que limita a sua utilização e aplicação mais frequentes, contudo são materiais tecnologicamente estratégicos e que possuem um amplo campo de aplicação. Já foram realizados estudos tanto por V. Gheorghe [16] e por T. Ishikawa [17] sobre estes materiais.

2.2.1.1 Aço S355J2H

O estudo do aço nesta dissertação assenta, sobretudo, na indagação se este suporta as condições necessárias para a sua utilização, sendo estas caracterizadas por peso relativamente baixo e alta resistência, por estar sujeito a esforços severos e choques repentinos e conter uma resistência à corrosão adequada.

O aço S355J2H possui uma boa tenacidade, uma boa ductilidade e um grão fino, sendo este aplicado no setor de transportes. Para estas aplicações, os aços indicados são os de baixo teor de liga, sendo que o aço em estudo é o S355J2H (Aço ao Carbono), como já foi referido.

A Tabela 2 apresenta a composição química do aço em questão.

Tabela 2-Composição química do aço S355J2H [18]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,22	0,55	1,60	0,035	0,035

O aço usado para o estudo das ligações tem a designação de S355J2H, sendo que o símbolo J é relativo às propriedades de impacto do mesmo. As propriedades mecânicas do aço para uma espessura nominal inferior a 40 mm encontram-se apresentadas na Tabela 3, conforme o Eurocódigo 3-1-1 [19].

Tabela 3-Propriedades gerais do aço S355H (Simbologia de acordo com Eurocódigo 3) [19][20][21]

Designação	Simbologia	S355H
Tensão de cedência	f_y	355 MPa
Tensão de rotura	f_u	510 MPa
Módulo de elasticidade	E	210000 MPa
Módulo de corte	G	81000 MPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	ν	0,3
Coefficiente de expansão térmica	α	12×10^{-6} por K (para $T \leq 100^\circ\text{C}$)
Massa volúmica	ρ	7850 kg/m ³
Extensão após rotura	A	18%

Quanto às suas propriedades de impacto do aço, estas podem ser analisadas através do ensaio de impacto (ensaio Charpy), que tem como objetivo descobrir quando ocorre a mudança dos comportamentos do material, do comportamento dúctil para frágil, conseguindo ainda obter um segundo objetivo que se baseia na determinação da temperatura crítica [22].

Com a Tabela 4, consegue-se obter valores mais concretos das propriedades de impacto do aço em estudo e uma comparação de outros aços semelhantes, com propriedades de impacto de grau diferente.

Tabela 4-Valor máximo permitido de espessura do elemento para o aço S355 [23]

Nível de tensão: $\sigma/f_y=0,75$										
Grau do aço	Subclasse	Energia de teste Charpy		Temperatura de serviço (°C)						
		a T(°C)	J _{min}	10	0	-10	-20	-30	-40	-50
				Espessura máxima permitida (mm)						
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10
	JO	0	27	60	50	40	35	25	20	15
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25
	K2, M, N	-20	40	110	90	75	60	50	50	35
	ML, NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50

2.2.2 Soldadura

A soldadura é um dos processos de ligação de peças metálicas, sendo um dos mais usados devido à sua ótima relação custo-benefício. É um processo extremamente versátil, visto que pode ser aplicada a uma variada gama de materiais, formas e dimensões e, ainda, permite a ligação de uma elevada gama de espessuras [24].

As juntas produzidas por soldadura são inamovíveis, permanentes e reproduzíveis, geralmente ultrapassam a resistência patenteada pelos materiais de base ligados. Asseguram, igualmente, a continuidade metálica e podem ser inspecionadas por técnicas não-destrutivas [24].

Segundo a AWS [25], a soldadura é a operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de material de adição.

2.2.2.1 Classificação da soldadura

A soldadura semiautomática (MIG-MAG), processo de soldadura que será observado com maior pormenor ao longo da dissertação, notadamente devido ao uso da mesma para a união dos tubos de aço.

A soldadura semiautomática é um subgrupo que está inserido no grupo de soldadura por fusão, salientando-se, contudo, que existem diversos processos de soldadura por fusão. Geralmente, a classificação usual é a divisão de processos, atendendo-se ao tipo de fonte de energia usada para fundir as peças.

Na Tabela 5 são apresentados alguns processos de soldadura por fusão e suas características.

Tabela 5-Processos de soldadura por fusão e suas características [26]

Processo	Fonte de calor	Tipo de corrente e polaridade	Agente protetor	Outras características	Aplicações
Eléctrodo Revestido	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+) ou (-)	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldadura de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldadura em geral.
Metal Inert Gas – Metal Active Gas (MIG-MAG)	Arco eléctrico	Contínua. Eléctrodo (+)	Árgon ou Hélio, Árgon + O ₂ , Árgon + CO ₂ , CO ₂	Automática/mecanizada. Ou semiautomática. O arame é sólido.	Soldadura de aços ao carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 1 mm.
Tungsten Inert Gas (TIG)	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (-)	Árgon, Hélio ou misturas destes.	Manual ou automática. Eléctrodo não consumível de tungsténio. O arame é adicionado separadamente.	Soldadura de todos os metais exceto Zn, Be e suas ligas, espessura de 0,1 a 8 mm. Soldadura de materiais não ferrosos e aços inox.
Arco Submerso	Arco eléctrico	Contínua ou alternada. Eléctrodo (+)	Escória	Automática/mecanizada ou semiautomática. O arco funde sob uma camada de fluxo granular.	Soldadura de aços ao carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Plasma	Arco eléctrico	Contínua. Eléctrodo (-)	Árgon, Hélio, Árgon + Hidrogénio	Manual ou automática, o arame é adicionado separadamente. Eléctrodo não consumível de tungsténio.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas. Passes de raiz.

Laser	Feixe de luz		Árgon ou Hélio	Soldadura automática. Não usa, em geral, metal de adição. Laser permite uma elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais, exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria automóvel, nuclear e aeroespacial.
Feixe de eletrões	Feixe de luz	Contínua	Vácuo ($>>10^{-4}$ mmHg)	Soldadura automática. Não usa, em geral, metal de adição. Feixe de eletrões permite uma elevada concentração de energia.	Soldadura de todos os metais exceto nos casos de vaporização excessiva. Indústria nuclear, automóvel e aeroespacial.
Soldadura a gás	Chama oxiacetilénica		Gás (H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. adicionado separadamente.	Arame Soldadura manual de aço ao carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldadura de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

2.2.2.2 Soldadura semiautomática (MIG-MAG)

A soldadura MIG-MAG é bastante considerada devido às vantagens que aporta:

- é um processo de fácil operação;
- permite uma ausência de escória a eliminar após a realização da soldadura;
- tem excelentes características mecânicas no metal depositado;
- apresenta um custo bastante competitivo.

Este processo de soldadura é aplicável à maioria dos metais, incluindo os aços. É precisamente esta característica que nos levará a desenvolver uma abordagem mais pormenorizada sobre este processo de soldadura ao longo desta dissertação.

2.2.2.2.1 Princípios do processo e equipamento necessário

O processo de soldadura MIG-MAG é altamente produtivo, visto que tem uma taxa de deposição elevada. Este processo é conveniente para peças de grande espessura, sendo que é fácil de utilizar em diversas posições de soldadura (acima de 200 mm de espessura).

É um processo que envolve arco elétrico como meio energético para produzir a fusão do material de base e de adição, em que a corrente é guiada até à junta pelo próprio

material de adição. O material transferido através do arco elétrico e a poça de soldadura é protegido do contacto com o ar ambiente por um fluxo de gás inerte (Árgon ou Hélio) ou gás ativo (CO_2). É ideal para a soldadura de aços ao carbono, mas também é utilizado nos aços inoxidáveis e alumínio [24].

A Figura 5 apresenta um diagrama esquemático do processo de soldadura semiautomático MIG-MAG.

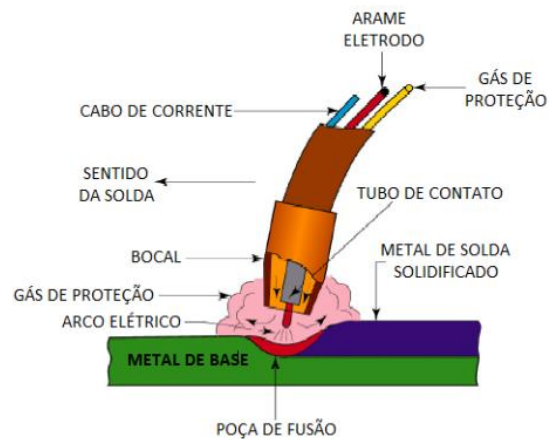


Figura 5-Diagrama esquemático do processo de soldadura semiautomática MIG-MAG [27]

Relativamente ao equipamento usado neste processo, a utilização do termo “semiautomático” deve-se, essencialmente, ao facto do fio e do gás serem alimentados de forma automática, enquanto o movimento de soldadura tem de ser executado por um soldador, de forma manual.

A Figura 6 demonstra o equipamento/circuito do processo de soldadura MIG-MAG.

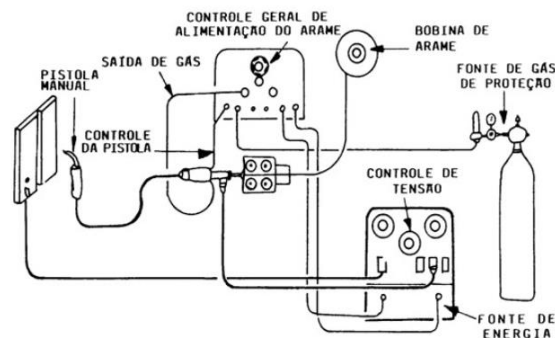


Figura 6-Circuito do processo de soldadura MIG-MAG [28]

2.2.2.2.2 Gases e misturas gasosas de proteção na soldadura pelo processo MIG-MAG

O processo MIG-MAG necessita obrigatoriamente de proteção gasosa, sendo que podem ser usados gases inertes ou gases ativos. No entanto, são necessários critérios para fazer a seleção mais adequada dos gases a usar, isto é, ter em consideração:

- o material de adição;
- as propriedades mecânicas na junta soldada;
- a espessura do material de base e a geometria da junta;
- a posição em que se vai executar a soldadura e o modo de transferência pretendido.

Sob a ação do calor característico do arco, os gases de proteção respondem de forma diferente, sendo que é preciso considerar alguns aspetos:

- o potencial de ionização do gás ou dos diferentes componentes da mistura gasosa;
- a condutividade térmica de cada um dos componentes da mistura gasosa;
- a reatividade química com a poça de metal fundido.

A Tabela 6 realça os campos de aplicação dos gases e misturas gasosas de proteção na soldadura MIG-MAG.

Tabela 6-Campos de aplicação dos gases e misturas gasosas de proteção na soldadura MIG-MAG [24]

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Árgon	Inerte	Quase todos os metais, exceto o Aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + He (20-50%)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Azoto	-	Cobre (devido a maior energia térmica)
Ar + N ₂ (20-30%)	-	<i>idem</i> , mas melhor do que 100% N ₂
Ar + O ₂ (1-2%)	Oxidante Moderado	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + O ₂ (3-5%)	Oxidante	Aços ao Carbono e alguns Aços de baixa liga

CO ₂	Oxidante	Aços ao Carbono e alguns Aços de baixa liga
Ar + CO ₂ (20-50%)	Oxidante	Vários Aços. Transferência por Curto-Circuito
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Vários Aços

2.2.2.2.3 Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG

Os modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG estão presentes na Tabela 7, contendo uma explicação de cada transferência.

Tabela 7-Modos de transferência do metal de adição no processo MIG-MAG [24]

Transferência tipo curto-circuito

Para baixas energias do arco (50 a 200 A & 15 a 20 V), forma-se uma gota que aumentará de tamanho na ponta do fio à medida que é alimentado. A fraca força de estricção não permite o seu desprendimento. Posto isto, a transferência ocorre quando a gota entra em contacto com a poça de solda (curto-circuito). A corrente aumentará de uma forma acelerada e a gota separar-se-á. De seguida, o arco reinicia-se. Devido à energia envolvida, este tipo de arco permite a soldadura de peças de espessuras muito finas e em várias posições.

Transferência tipo globular

Com este modo de transferência, o arco é instável, sendo que as gotas formadas são de forma irregular e maiores que o diâmetro do arame. Este tipo de soldadura deve ser evitado, devido à instabilidade do arco e mau aspeto do cordão de soldadura. Aumentando a percentagem de Árgon, existe um incremento no campo de operação, onde esta pode ser uma solução para melhorar este tipo de transferência.

Transferência Spray

Acima de uma certa energia (> 300 A), a ponta do fio forma um longo cone, sendo que a transferência é feita por finas gotículas cujos diâmetros são inferiores ao do arame (alta taxa do depósito). Quando a corrente se forma muito alta (> 500 A), o “*spray-arc*” mantém-se. A corrente líquida começa a rodopiar devido às forças

eletromagnéticas e a transferência do metal torna-se mais difícil de controlar, sendo que este tipo de arco pode ser utilizado para taxas de depósito muito altas.

Modo tipo Pulsado

O modo de transferência de metal de adição é uma variante altamente controlada da transferência por pulverização axial, visto que, a intensidade de corrente de soldadura é composta por um ciclo entre um nível elevado de corrente de pico e um nível de base. A transferência de metal ocorre durante o nível de pico de alta energia, na forma de uma única gotícula derretida. Este modo de transferência é comparável ao “*spray-arc*” em termos de estabilidade e ausência de salpicos. Este tipo de arco é utilizado de preferência onde a transferência seria de outro modo globular. A corrente pulsada pode eliminar os problemas de transferência globular.

2.2.2.2.4 Parâmetros do processo

Os parâmetros do processo de soldadura MIG-MAG estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8-Parâmetros do processo [24]

Intensidade de corrente

A intensidade de corrente está diretamente relacionada com a taxa de fusão do fio de metal de adição, sendo que esta depende da velocidade de alimentação do fio. A intensidade depende de vários parâmetros, como a extensão livre do eletrodo, da velocidade de alimentação do fio, da resistividade do eletrodo, do calor anódico ou catódico, conforme a polaridade que é usada. É um parâmetro do processo importante, visto que, incrementando uma intensidade de corrente, mantendo as outras variáveis iguais, o cordão de soldadura apresentará uma maior largura e penetração.

Tensão e comprimento do arco

O comprimento do arco está interligado com a tensão fornecida pela fonte. Um comprimento de arco pequeno poderá provocar curtos-circuitos acidentais, nas quais origina instabilidade do arco elétrico e porosidades no cordão. Em contrapartida, o uso de um comprimento de arco elevado também não é favorável, visto que existe tendência a oscilar, o que provoca uma largura e penetração irregulares e bordos queimados. Salientar que uma maior tensão de alimentação à

saída origina uma largura de cordão superior e reduz a penetração. Desta forma, a seleção da tensão a utilizar à saída da fonte para o material de base que está a ser utilizado é de ter em conta, o gás de proteção e o modo de transferência programado.

Velocidade de soldadura

A velocidade de soldadura é a deslocação linear por unidade de tempo da tocha ao longo do cordão da junta, sendo que esta é definida pelo soldador, processo semiautomático, ou definido pelo gabinete de preparação de trabalho, processo automático. Esta influencia a penetração e a largura do cordão, salientado que se houver um incremento da velocidade, mantendo todas as restantes variáveis constantes, a penetração aumenta até a um valor limite, diminuindo após ultrapassar esse mesmo valor. Quanto maior for a velocidade de soldadura, mais estreito ficará o cordão, acontecendo o inverso quando se diminui a velocidade. Referir que se existe um aumento da velocidade, acaba por haver um aumento de energia térmica por unidade de comprimento fornecida ao material, numa fase inicial, devido à ação mais incisiva do arco sobre o material de base, acabando por diminuir numa fase posterior. Posto isto, ocorre a fusão do material de base, numa primeira fase, diminuindo de seguida com o aumento da velocidade de soldadura. O excesso de velocidade pode provocar bordos queimados e falta de penetração em certas zonas da soldadura.

Extensão livre do eléctrodo

A extensão livre do eléctrodo constitui um acréscimo da resistência, estando a mesma relacionada com a taxa de fusão do fio de material de adição. Se a extensão do eléctrodo for aumentada e mantendo as restantes variáveis iguais, constata-se um incremento de calor desenvolvido, existindo um aumento da taxa de fusão do fio. Se a mesma for curta, poderá não desenvolver calor suficiente, sendo que, ocorre uma queda da taxa de fusão. Com uma extensão em demasia, o arco poderá ficar instável, elevando o número de projeções, retirando o efeito da proteção gasosa e por consequente, introduz porosidades no cordão de soldadura.

Posição da tocha

A posição da tocha assume um papel de relevo na qualidade do cordão a ser efetuado, sendo que esta afeta fortemente a transmissão de calor do material de base, dando origem a uma maior ou menor penetração. As posições são escolhidas mediante o trabalho que se quer executar, salientando que dependendo das posições, pode existir maior dificuldade a executar o cordão de soldadura. Salientar

que o aumento do ângulo da tocha no processo de soldadura é significativo na redução da área de penetração do cordão e na diluição [29].

Diâmetro do eletrodo

A seleção do diâmetro do fio é normalmente efetuada segundo a posição de soldadura e segundo a espessura do material de base. Com diâmetros de fios maiores, a intensidade de corrente será maior, podendo afirmar-se que existe uma maior penetração, visto que, a taxa de fusão do fio foi aumentada. A Figura 7 apresenta uma relação entre o diâmetro do fio, velocidade de alimentação e intensidade de corrente.

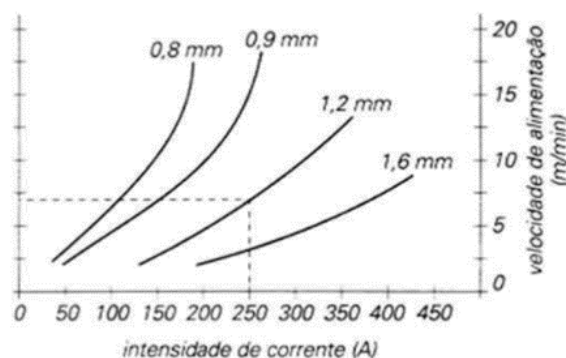


Figura 7-Relação entre o diâmetro do fio, intensidade de corrente e velocidade de alimentação do arame no processo MIG-MAG [30]

Tipo de gás de proteção

A principal função do gás protetor utilizado neste processo de soldadura é proteger o banho de fusão do contacto com a atmosfera envolvente. Vários aspetos como as características do arco elétrico, modo de transferência, geometria do cordão e características mecânicas e metalúrgicas do metal fundido influenciam o tipo de gás a selecionar, sendo que a densidade do gás de proteção tem uma influência importante sobre a eficiência da proteção do arco e da poça de fusão contra a atmosfera ambiente. A condutividade térmica do mesmo afeta a temperatura do arco e da poça de fusão, contudo o tipo de meio de proteção não influencia essencialmente a taxa de fusão [31].

Polaridade

A polaridade designa a forma como o fio de material de adição e o alicate de massa são conectados à fonte de alimentação, salientando que só são utilizadas fontes de

alimentação de corrente contínua neste processo. A polaridade positiva é, na maioria das vezes, a mais utilizada devido a existir uma maior estabilidade do arco, não existe tanta geração de respingos e a geometria de cordões que é criada é mais adequada. A polaridade negativa proporciona uma maior taxa de fusão, contudo dependendo do modo de transferência e gás de proteção (influencia os parâmetros geométricos de forma diferente dependendo da polaridade usada) utilizado é possível obter uma transferência sem gotas repulsivas [32].

2.2.2.2.5 Vantagens e desvantagens e suas aplicações

O processo de soldadura MIG-MAG tem uma variedade de metais em que pode ser aplicado este tipo de soldadura, salientando-se que o mesmo processo pode:

- soldar em todas as posições;
- tem um controlo de penetração razoável, usa DC (+);
- tem níveis de hidrogénio reduzidos;
- não apresenta escória, exceto com CO₂;
- é um processo automatizado e com eletrodo contínuo.

Este processo exibe algumas limitações como:

- as faltas de fusão (colagens);
- limitações a espessuras de 50 mm;
- necessita de um soldador com competências para o processo de soldadura;
- custos dos gases de proteção são elevados e existe uma grande sensibilidade às correntes de ar.

2.2.2.3 Soldadura do S355J2H

As propriedades do aço levam à economia de material e por conseguinte, à economia do projeto, atendendo a rígidos requisitos de construção.

O aço S355J2H apresenta uma excelente soldabilidade e os valores da soldadura efetuada podem ser empiricamente correlacionados com a resistência mecânica [33], sendo que foi demonstrado uma elevada resistência à fadiga, comparando-se este ao

aço S355J0H, conseguindo obter um maior número de ciclos até à fratura, aplicando-se a mesma carga nos diferentes aços [34].

Sendo este aço um laminado a quente, foi efetuado um estudo no qual se verificou um desempenho melhor, ao nível da fadiga, comparado a um laminado a frio [35]. Saliente-se que foi executado um trabalho para examinar a influência das tensões residuais de solda no comportamento de crescimento de fissura por fadiga, tendo-se concluído que a orientação do provete, em relação à geometria de solda, desempenha um papel significativo no comportamento de crescimento de fissuras de fadiga do material [36][37].

Relativamente ao impacto, o S355J2H tem bastante potencial, visto que, no ensaio de Charpy apresenta uma energia de 27 J a uma temperatura de -20°C [38]. Salientar que existe a possibilidade de realizar pós-tratamentos para melhorar o impacto de diversos aços, estudo este que foi realizado por Schubnell [39].

Destaca-se um estudo no qual se refere que o comportamento mecânico do aço estrutural S355 é destacado a 550°C, onde foi observado um aumento da resistência, bem como uma redução do alongamento total em relação aos testes realizados a 400°C [40]. Contudo, com o aumento da temperatura existe perdas das propriedades mecânicas do aço, simplesmente o estudo destaca um comportamento incomum.

Em suma, a soldadura não afeta o aço em estudo, deste modo, é correto dizer-se que apresenta boa soldabilidade, contudo destaque-se um estudo que concluiu que juntas soldadas com o S355 estavam isentas de defeitos, não existindo criação de fissuras e apresentando valores de resistência superiores a valores tabelados [33].

2.3 Eurocódigo 3

De modo a facilitar a análise estrutural das juntas tubulares soldadas e, tendo como base o capítulo 7 da NP EN 1993-1-8 [41], pretende-se nesta dissertação evidenciar uma linha lógica dos cálculos necessários a realizar para a verificação de segurança da junta em estudo, deste modo o Eurocódigo 3 assume-se de extrema importância para efetuar estas verificações.

2.3.1 Regulamento

O regulamento é um conjunto de normas e orientações que tem como objetivo organizar algo, do qual mencionamos a título exemplificativo o Eurocódigo 3, sendo este uma norma que irá ser objeto de uma análise mais aprofundada.

O Eurocódigo 3 indica modelos numéricos para a determinação das características de comportamento das ligações metálicas, assim como, estabelece valores limite destes parâmetros que permitem a sua classificação. Contém seis partes. A Tabela 9 apresenta a primeira parte deste Eurocódigo, sendo a mais relevante para esta dissertação.

Tabela 9-Parte 1 do Eurocódigo 3 [42]

Norma	Título	NP EN correspondente
EN 1993-1-1:2005	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios	NP EN 1993-1-1:2010
EN 1993-1-2:2005	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo	NP EN 1993-1-2:2010
EN 1993-1-3:2006	<i>Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold formed members and sheeting</i>	
EN 1993-1-4:2006	<i>Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels</i>	
EN 1993-1-5:2006	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-5: Elementos estruturais constituídos por placas	NP EN 1993-1-5:2012
EN 1993-1-6:2007	<i>Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-6: Strength and stability of shell structures</i>	
EN 1993-1-7:2007	Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading	

EN 1993-1-8:2005	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projeto de ligações	NP EN 1993-1-8:2010
EN 1993-1-9:2005	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-9: Fadiga	NP EN 1993-1-9:2010
EN 1993-1-10:2005	Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço – Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura	NP EN 1993-1-10:2010
EN 1993-1-11:2006	<i>Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components</i>	
EN 1993-1-12:2007	<i>Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S 700</i>	

A parte que vai ser objeto de maior aprofundamento e análise nesta dissertação, para o caso de estudo, é o capítulo 7 da NP EN 1993-1-8 [41], que, a partir deste momento, designaremos por EC3-1-8.

Este subcapítulo tem como base juntas de perfis tubulares onde são tratadas as ligações entre tubos de secções retangulares ou circulares, em que indica que tipo de ligações tubulares se devem utilizar e os seus modos de ligação, expressando os principais modos de rotura que podem surgir nessas mesmas ligações.

Inúmeros estudos recorrendo ao Eurocódigo são feitos nas mais diversas áreas da engenharia. Cite-se a título de exemplo o dimensionamento de elementos estruturais de aço enformado a frio, que tem como objetivo dimensionar a estrutura, obtendo os resultados desejados com recurso a toda a metodologia do Eurocódigo 3 [43][44], ou, por exemplo, a análise térmica de um perfil em aço sobre ação do fogo [45], com o mesmo princípio do que já foi referido no estudo anterior.

2.3.2 Princípio para o dimensionamento segundo o Eurocódigo 3

A aplicação deste regulamento é para os seguintes estados limites:

- Segurança das pessoas e da estrutura;

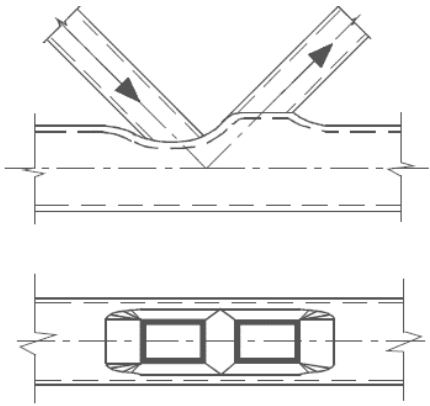
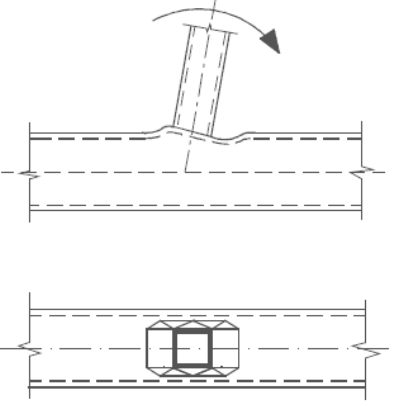
- Funcionamento da estrutura nas condições normais de utilização;
- Estados limites de utilização irreversíveis e reversíveis.

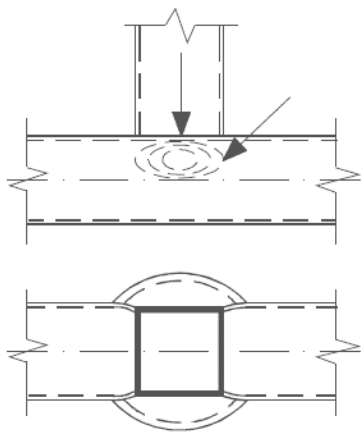
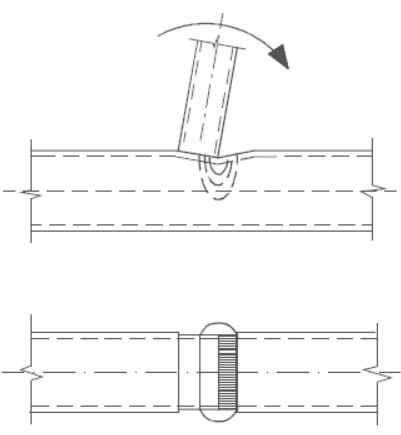
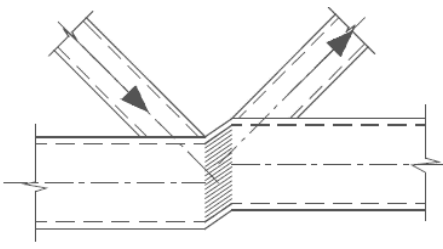
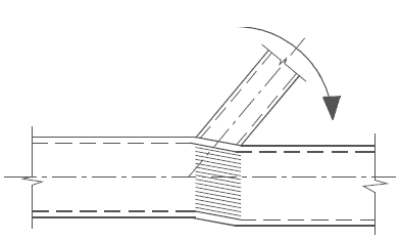
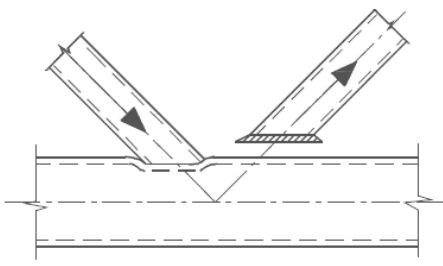
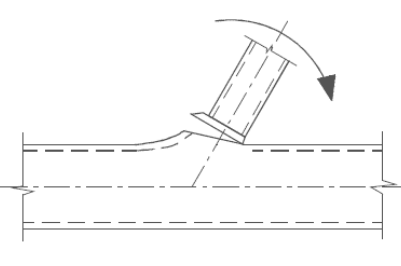
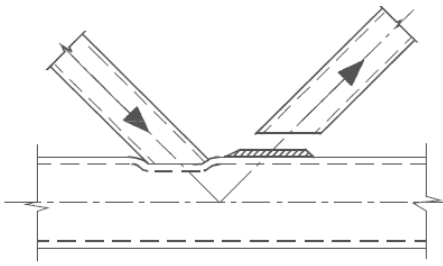
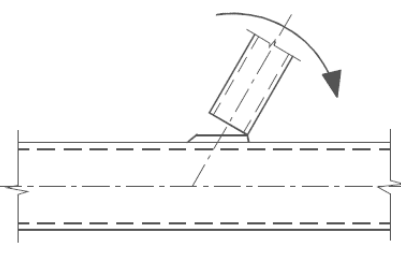
Desta forma, será necessário ter uma percepção dos modos de rotura que podem ocorrer, como já foi referido anteriormente, sendo que foi efetuada uma consulta à norma EC3-1-8, verificando os diferentes modos de rotura que podem ocorrer em juntas entre elementos diagonais *Rectangular Hollow Sections* (RHS) e cordas RHS.

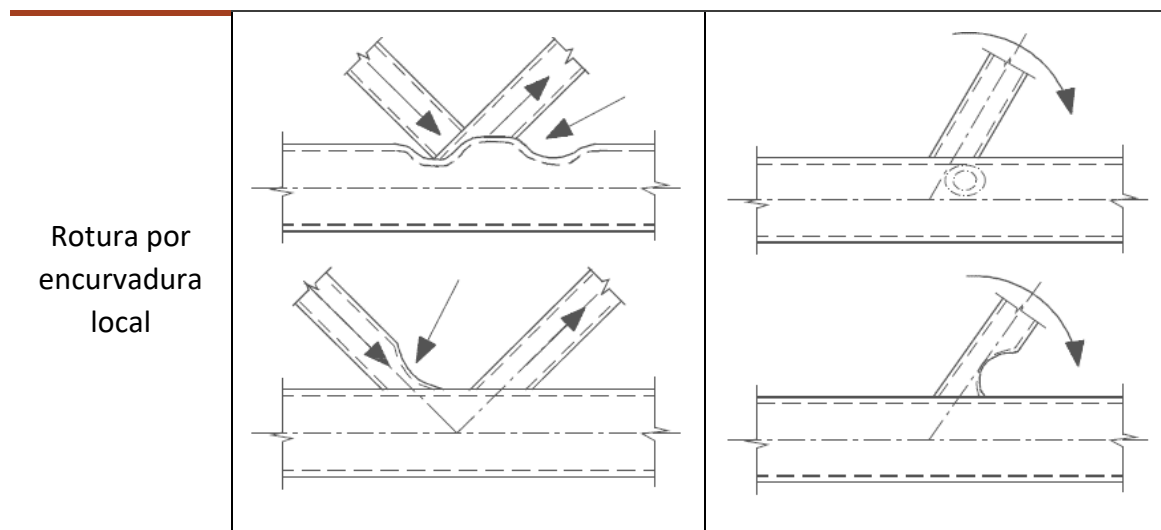
Saliente-se, contudo, que existem modos de rotura para juntas entre elementos diagonais *Circular Hollow Sections* (CHS) e cordas RHS, contudo nesta dissertação só se mencionarão casos mais específicos sobre juntas RHS, visto que o estudo que vai ser efetuado será de perfis tubulares com secções retangulares.

A Tabela 10 apresenta os modos de rotura para juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS.

Tabela 10-Modos de rotura para juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS

Modo	Esforços normais	Momento fletor
Rotura da face da corda		

Rotura da parede lateral da corda		
Rotura por corte da corda		
Rotura por punçoamento		
Rotura do elemento diagonal		



Os esforços normais resistentes aplicados, presentes na Tabela 10, são os valores de carga que originam a plastificação em cada um dos modos de rotura apresentados.

Para qualquer tipo de junta, o cordão de soldadura deve ser algo a definir, de forma a obter a melhor resistência possível do cordão. Neste enquadramento, o primeiro ponto a definir é o comprimento do cordão, sendo que o mesmo deve ter um comprimento efetivo igual ao comprimento em que o cordão tem a sua secção completa.

O comprimento do cordão de soldadura mantém-se se a espessura não variar até ao fim da soldadura. Saliente-se que o comprimento efetivo não deve ser inferior a 30 mm ou 6 vezes a sua espessura.

O segundo ponto a definir é a espessura efetiva do cordão, impondo-se que a mesma não pode ser inferior a 3 mm, sendo esta igual à altura do maior triângulo (com lados iguais ou desiguais) que pode ser inscrito no espaço limitador pelas faces a soldar e pela superfície de soldadura.

Por fim, utiliza-se um método para o cálculo da resistência do cordão de ângulo, estando o mesmo presente na Tabela 11.

Tabela 11-Método simplificado para o cálculo da resistência do cordão de ângulo (Expressões)

Equação	Explicação
$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$	Em qualquer secção transversal, a resultante de todos os esforços por unidade de comprimento transmitidos pela soldadura tem de satisfazer este critério
$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a$	Independentemente da orientação do plano que define a espessura da soldadura em relação ao esforço aplicado, o valor de cálculo da resistência por unidade de comprimento é determinado através desta equação
$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{MW}}$	Equação para determinar o valor de cálculo da resistência ao corte da soldadura

Onde:

$F_{w,Ed}$ – Valor do cálculo do esforço atuante na soldadura por unidade de comprimento;

$F_{w,Rd}$ – Valor do cálculo da resistência da soldadura por unidade de comprimento;

$f_{vw,d}$ – Valor do cálculo da resistência ao corte da soldadura;

a – Espessura efetiva do cordão de ângulo;

β_w – Fator de correlação para soldaduras de ângulo;

f_u – Valor nominal da tensão de rotura à tração da peça ligada mais fraca;

γ_{MW} – Coeficiente parcial de segurança para a ligação.

2.3.3 Estudo de um dos casos do Eurocódigo 3

Para efetuar o estudo segundo o Eurocódigo, foi escolhida uma ligação muito usual numa superestrutura de um veículo pesado de passageiros, a ligação em T.

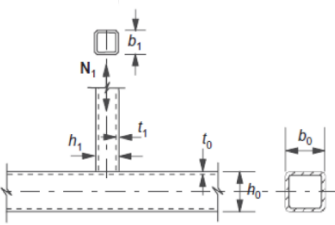
Os métodos que irão ser apresentados, só são válidos se a geometria das juntas estiver dentro do domínio de validade indicado na Tabela 12.

Tabela 12-Domínio de validade de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS

Tipo de junta	Parâmetros das juntas [$i=1$ ou 2 , j =elemento diagonal sobreposto]					
	b_i/b_0 ou d_i/d_0	b_i/t_i e h_i/t_i ou d_i/t_i		h_0/b_0 e h_i/b_i	b_0/t_0 e h_0/t_0	Afastamento ou sobreposição b_i/b_j
		Compressão	Tração			
T, Y ou X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ e $h_i/t_i \leq 35$	$b_i/t_i \leq 35$ e $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$ mas $\leq 2,0$	≤ 35 e Classe 1 ou 2	-
K com afastamento N com afastamento	$b_i/b_0 \geq 0,25$ e $\geq 0,1 + 0,01b_0/t_0$	Classe 1 ou 2			≤ 35 e Classe 1 ou 2	$g/b_0 \geq 0,5(1-\beta)$ mas $\leq 1,5(1-\beta)$ e como mínimo $g \geq t_1 + t_2$

Onde:

Tabela 13-Lengenda dos parâmetros

	t_i – Espessura da parede do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3)
	h_i – Altura total no plano da secção transversal do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3)
	d_i – Diâmetro total do elemento de CHS i ($i=0,1,2$ ou 3)
	b_i – Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3)
	g – Afastamento entre elementos diagonais numa junta K ou em N

Posto isto, exhibe-se o caso em estudo.

2.3.3.1 Caso de estudo

Este caso de estudo refere-se a uma junta soldada em T, sem reforço, constituída por dois perfis tubulares com secções retangulares.

Para complementar o domínio referido na Tabela 12, opta-se por verificar as condições suplementares da Tabela 14.

Tabela 14-Condições suplementares para juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS

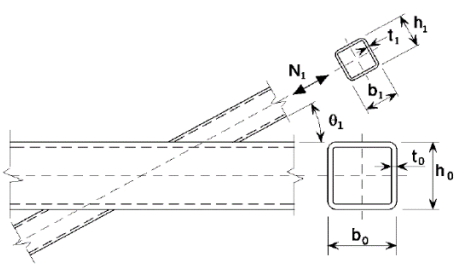
Tipo de elemento diagonal	Tipo de junta	Parâmetros da junta	
Secção tubular quadrada	T, Y ou X	$b_i/b_0 \leq 0,85$	$b_0/t_0 \geq 10$
	K com afastamento ou N com afastamento	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$b_0/t_0 \geq 15$

Com os valores todos validados, passa-se para o cálculo dos valores dos esforços normais resistentes, sendo estes esforços que originam os modos de rotura que foram apresentados na Tabela 10.

Para o caso de encurvadura da parede lateral da corda, presente na Tabela 15, é necessário para $0,85 \leq \beta \leq 1,0$ efetuar uma interpolação linear entre o valor para a rotura da face de corda com $\beta=0,85$ e o valor que condiciona a rotura das paredes laterais da corda com $\beta=1,0$.

Para efetuar o cálculo das equações presentes na Tabela 15, é necessário algumas variáveis exibidas na Tabela 16.

Tabela 15-Valores de cálculo do esforço normal resistente de juntas soldadas em T, X e Y entre elementos diagonais RHS e cordas RHS

Tipo de junta	Valor de cálculo de resistência
	Rotura da face da corda ($\beta \leq 0,85$)
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$
	Encurvadura da parede lateral da corda ($\beta=1,0$)
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_b t_0}{\sin \theta_1} \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5}$
	Rotura do elemento diagonal ($\beta \geq 0,85$)
	$N_{1,Rd} = f_{yi} t_1 (2h_1 - 5t_1 + 2b_{e,p}) / \gamma_{M5}$
	Punçoamento ($0,85 \leq \beta \leq (1-1/\gamma)$)
	$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$

Onde:

$N_{i,Rd}$ – Valor do cálculo da resistência da junta, expresso em termos de esforço normal atuante no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

k – Fator definido no quadro apropriado, com índice g, m, n ou p;

f_{yi} – Tensão de cedência do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

β – Cociente das larguras dos perfis tubulares;

θ_i – Ângulo (agudo) interno entre o elemento diagonal i e a corda i ($i=0,1,2$ ou 3);

η – Relação entre a altura do elemento diagonal e o diâmetro ou a largura da corda;

f_b – Resistência à encurvadura da parede lateral da corda;

$b_{e,p}$ – Largura efetiva para a resistência ao punçoamento.

Tabela 16-Informação complementar para o cálculo do esforço normal resistente de juntas soldadas em T, X e Y entre elementos diagonais RHS e cordas RHS

Para a tração $f_b = f_{y0}$	$b_{eff} = \frac{10f_{y0}t_0}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)f_{y1}t_1} b_1 \text{ mas } b_{eff} \leq b_1$
Para a compressão: $f_b = \chi f_{y0}$ (juntas em T e Y) $f_b = 0,8\chi f_{y0} \text{sen}\theta_1$ (juntas em X) em que: χ coeficiente de redução para a encurvadura por flexão obtido da EN 1993-1-1, com base na curva de encurvadura apropriada e uma esbelteza $\bar{\lambda}$ determinada a partir de:	$b_{e.p} = \frac{10}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)} b_1 \text{ mas } b_{e.p} \leq b_1$
$\bar{\lambda} = 3,46 \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2\right) \sqrt{\frac{1}{\text{sen}\theta_1}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}}$	Para $n > 0$ (compressão): $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \text{ mas } k_n \leq 1,0$ Para $n \leq 0$ (tração): $k_n = 1,0$

Onde:

k – Fator definido no quadro apropriado, com índice g, m, n ou p;

b_{eff} – Largura efetiva da ligação de um elemento diagonal a uma corda;

$b_{e.p}$ – Largura efetiva para a resistência ao punçoamento.

Após efetuar os cálculos dos esforços normais, salienta-se que as ligações de elementos diagonais solicitados por uma combinação de esforço normal e de momentos fletores devem satisfazer a seguinte equação:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

Onde:

$N_{i,Ed}$ – Valor de cálculo do esforço normal atuante no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

$N_{i,Rd}$ – Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos de esforço normal atuante no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

$M_{ip,i,Ed}$ – Valor de cálculo do momento fletor no plano no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

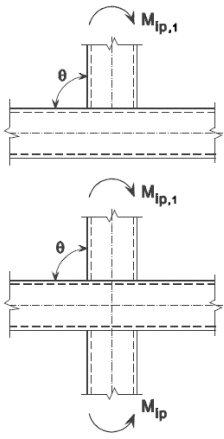
$M_{ip,i,Rd}$ – Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do momento fletor atuante no plano do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

$M_{op,i,Ed}$ – Valor de cálculo do momento fletor no plano perpendicular ao eixo do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

$M_{op,i,Rd}$ – Valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do momento fletor atuante no plano perpendicular ao eixo do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3).

Para obter as variáveis impostas da equação acima, é necessário efetuar o cálculo da resistência à flexão da junta soldada. A Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 expõem os valores de cálculo necessários.

Tabela 17-Valores de cálculo da resistência à flexão de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS (Momentos no plano)

Juntas em T e em X	Valor de cálculo da resistência
Momentos no plano ($\theta=90^\circ$)	Rotura da face da corda ($\beta \leq 0,85$)
	$M_{ip,1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right)}{\gamma_{M5}}$
	Esmagamento da parede lateral da corda ($0,85 < \beta \leq 1,0$)
	$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 f_{yk} t_0 (h_1 + 5t_0)^2}{\gamma_{M5}}$ $f_{yk}=f_{y0}$ para juntas em T $f_{yk}=0,8f_{y0}$ para juntas em X
	Rotura do elemento diagonal ($0,85 < \beta \leq 1,0$)
	$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right) b_1 (h_1 - t_1) t_1 \right)}{\gamma_{M5}}$

Onde:

$W_{pl,i}$ – Módulo de flexão plástica da secção do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3).

Tabela 18-Valores de cálculo da resistência à flexão de juntas soldadas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS (Momentos fora do plano)

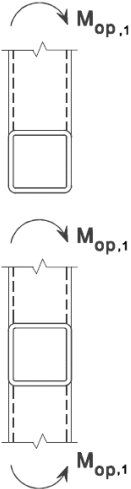
Juntas em T e em X	Valor de cálculo da resistência
Momentos fora do plano ($\theta=90^\circ$)	Rotura da face da corda ($\beta \leq 0,85$)
	$M_{op,1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{h_1(1+\beta)}{2(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2b_0b_1(1+\beta)}{1-\beta}} \right)}{\gamma_{M5}}$
	Esmagamento da parede lateral da corda ($0,85 < \beta \leq 1,0$)
	$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{yk} t_0 (b_0 - t_0) (h_1 + 5t_0)}{\gamma_{M5}}$ $f_{yk}=f_{y0}$ para juntas em T $f_{yk}=0,8f_{y0}$ para juntas em X
	Rotura por distorção da corda (unicamente para juntas em T)
	$M_{op,1,Rd} = \frac{2f_{y0} t_0 (h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0 t_0 (b_0 + h_0)})}{\gamma_{M5}}$
	Rotura do elemento diagonal ($0,85 < \beta \leq 1,0$)
	$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - 0,5 \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right)^2 b_1^2 t_1 \right)}{\gamma_{M5}}$

Tabela 19-Parâmetros complementares para as tabelas anteriores

Parâmetros b_{eff} e k_n	
$b_{eff} = \frac{10f_{y0}t_0}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)f_{y1}t_1} b_1 \text{ mas } b_{eff} \leq b_1$	Para $n > 0$ (compressão): $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \text{ mas } k_n \leq 1,0$ Para $n \leq 0$ (tração): $k_n = 1,0$

Deste modo, com todos os dados apresentados relativos ao EC3-1-8, é possível fazer uma verificação de segurança da junta, seguindo uma linha lógica dos cálculos.

2.4 Simulação Numérica

No desenvolvimento desta dissertação, pretende-se realizar o estudo do comportamento de juntas tubulares soldadas através do método de elementos finitos. Assim, neste âmbito é realizada uma breve abordagem a este método.

A simulação numérica é o estudo de algoritmos que busca resultados numéricos de problemas das mais diferentes áreas do conhecimento humano, modelados matematicamente.

O Método de Elementos Finitos é um método numérico cuja sua formulação corresponde ao método dos deslocamentos, no qual as incógnitas são os deslocamentos e as solicitações são conhecidas. Contudo, noutros tipos de análises, as variáveis de campo podem ser temperaturas, velocidades de fluido, entre outras [46].

Este método permite transformar uma distribuição contínua em unidades individuais de um domínio nos chamados Elementos Finitos (EF), ligados pelos seus nós, e cuja simplificação resulta na criação de um sistema de equações algébricas como alternativa às equações constitutivas integrais ou diferenciais que estão na base do método [47].

Além de reduzir tempo e custos de projeto, os *softwares* de simulação computacional também são excelentes ferramentas de vantagem competitiva. Permitem às empresas desenvolver produtos mais eficientes, robustos e de maior qualidade, em menor tempo, e comercializá-los antes mesmo da concorrência.

Os *softwares* de simulação computacional permitem ainda, um facilitismo na identificação de gargalos no sistema, realizam análises ao comportamento de uma estrutura, possibilitando a experimentação de situações mais específicas ou até mesmo diferentes, para obter maior conhecimento sobre o projeto em estudo.

Existem, também, pontos negativos da utilização da simulação numérica, visto que os resultados que são obtidos são, na maioria das vezes, de difícil interpretação, fundamentalmente devido:

- à existência de uma variabilidade do sistema;
- a construção dos modelos para proceder às simulações que exige experiência e muito treino no *software* a utilizar;
- a modelação e testagem com modelos consomem muitos recursos, principalmente tempo.

A tentativa de simplificação da modelação pode inviabilizar a sua aplicação, tornando mais viável o uso de métodos analíticos, que trazem resultados menos ricos, mas são mais económicos.

A Figura 8 apresenta um exemplo sobre o impacto da simulação e a sua rentabilidade de produto.

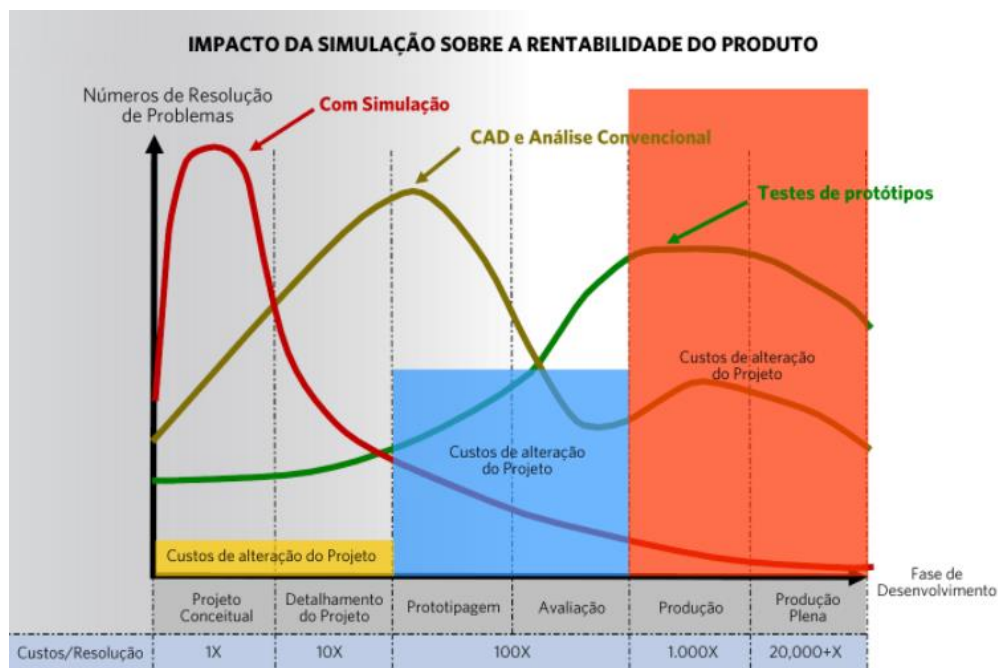


Figura 8-Impacto da simulação sobre a rentabilidade do produto [48]

Existem vários estudos feitos recorrendo a simulações numéricas, nomeadamente estudos com o intuito de reduzir zonas de concentração de tensões [49][50].

Nestes estudos, investigou-se a relação da posição de furos em placas finas e a influência da geometria do problema no fator de concentração de tensões, chegando-se à solução através de métodos analíticos e experimentais, sendo estes comprovados com resultados obtidos através de análise numérica.

Outro exemplo de estudo recorrendo a simulação numérica foi feito por Goedel [51]. Este autor realizou uma simulação numérica de uma estrutura de um autocarro rodoviário submetido a um impacto semifrontal contra uma parede rígida. Deste estudo, concluiu-se a existência de vários pontos importantes como:

- a influência do ângulo de inclinação da parede rígida sobre a qual o autocarro colide;
- a influência do *offset* entre o autocarro e a parede;
- a influência da velocidade inicial

O estudo permitiu, ainda, salientar que decorrente desta simulação foi possível determinar cenários de impacto, conseguindo-se avaliar mecanismos de absorção de energia a ser implementados na estrutura de um autocarro.

Por último, a Figura 9 e Figura 10 apresentam exemplos de análises que foram realizadas por simulação numérica e a Tabela 20 exhibe vários estudos realizados através deste método.

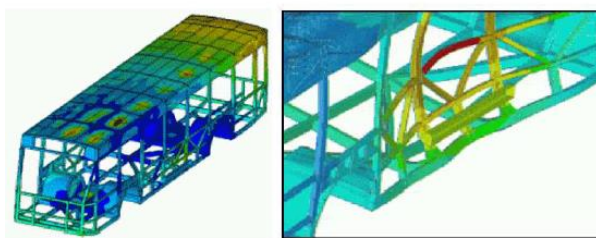


Figura 9-Ensaio feito por simulação numérica a parte lateral de um veículo pesado de passageiros [52]

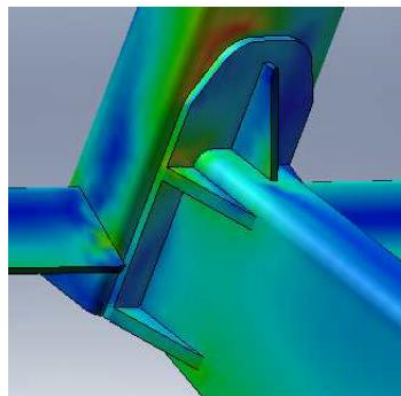


Figura 10-Ensaio feito por simulação numérica a uma ligação da estrutura de um veículo pesado de passageiros [52]

Tabela 20-Estudos realizados através de simulação numérica

Referências	Descrição do trabalho
[53] Rincón-Dávila, D.; Alcalá, E.; Martín, 2019	O objetivo deste trabalho foi estudar a resistência de estruturas metálicas de um veículo pesado de passageiros e veículo pesado de passageiros reparados por endireitamento mecânico após um capotamento, analisando a mudança na curva característica momento-ângulo e quantificando a perda de capacidade de absorção de energia. Foram realizados ensaios de flexão em perfis de aço de secção retangular de pequena espessura, simulando os danos causados por um primeiro acidente, bem como o reparo por endireitamento e posterior deformação em um segundo acidente. Com base nesses testes, a perda na capacidade de absorção de energia foi calculada e amostras foram obtidas para micrografias para observar como grandes deformações afetam a microestrutura. Os resultados mostraram diferenças significativas no comportamento dos perfis reparados, bem como uma perda na capacidade de absorção de energia superior a 30% em alguns casos.
[54] Karliński, J.; Ptak, M.; Działak, P.; Rusiński, E., 2014	Foi realizada a modelação de uma superestrutura de um veículo pesado de passageiros e a sua análise de resistência pelo método dos elementos finitos. O espaço residual durante e após o teste de capotamento em um veículo completo não deve ser danificado. Ocorreram deformações significativas dos perfis da estrutura da carroçaria, principalmente na parte frontal. O autocarro AUTOMET 2DX0AZ atendeu aos requisitos estabelecidos no Regulamento Nº 66 da UNECE.
[55] Lavayen-Farfan, Daniel; Boada, Maria Jesus L.; Rodriguez-Hernandez, Jorge A., 2021	O comportamento de colapso de formas quadradas e retangulares de paredes médias e finas é abordado. Estudou-se a influência de espessuras maiores na resistência e na energia absorvida. Simulações numéricas e experiências foram realizadas para formas de diferentes tamanhos. Uma modificação à teoria original do colapso foi proposta. As aplicações industriais dependiam de simulações numéricas, testes não padronizados e um punhado de teorias para abordar o comportamento do colapso por flexão. Os resultados mostraram que as modificações propostas podem prever o comportamento da carga máxima e do estágio de colapso de

perfis vazados com mais precisão do que o modelo analítico original.

[56] Saffirna, M.S.; Jiang, X.X.; Rejab, M.R.M.; Lim, K.S.; Guo, N.N.; Bangle, Wang, 2021

A rigidez e resistência da placa sanduíche variam dependendo do elemento de material similar (SI) ou dissimilar (DSI) (*faceplate* ou núcleo) e geometria da solda a laser. Assim, a pesquisa sobre diferentes propriedades do material e características de solda de junta em T de chapas de aço sanduíche *I-core* apresenta uma compreensão positiva de vários fatores de caráter que afetam o desempenho de flexão de chapas sanduíche. Além disso, há uma mudança significativa quando o *rootgap* está presente. A largura da solda produz uma flexão perfeita como junta em T saudável, mas alcançar tais características é impossível na realidade, mas possível quando o comprimento da solda está mais próximo do comprimento do núcleo.

Em suma, a simulação numérica é uma mais-valia para avaliar vários parâmetros de uma estrutura, assim sendo, este processo vai ser utilizado nesta dissertação para efetuar a análise à junta tubular em estudo. A junta a ser analisada, já foi referida anteriormente, contudo está presente na Figura 11 e Figura 12.

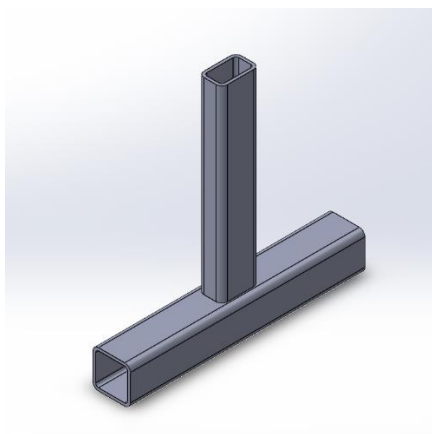


Figura 11-Junta em T modelada em CAD

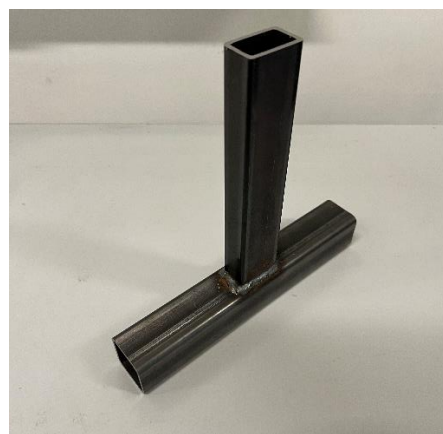


Figura 12-Junta em T fabricada

DESENVOLVIMENTO

3.1 Caraterização da empresa

3.2 Materiais, métodos e resultados

3.3 Análise e discussão de parâmetros que influenciam a
ligação

3.4 Propostas de melhoria construtiva

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Caraterização da empresa

3.1.1 Apresentação do Grupo Salvador Caetano

Em 1926 nasce, em Vila Nova de Gaia, Salvador Fernandes Caetano, o homem que viria a marcar o destino da Salvador Caetano. Filho de família humilde, começa a trabalhar com onze anos, conquista a sua independência aos dezoito anos e aos vinte, em 1946, cria a empresa Martins & Caetano & Irmão, Lda, com atividade no fabrico de carroçarias para autocarros.

Esta pequena empresa foi pioneira em Portugal, na utilização de madeira e aço no fabrico de carroçarias. Em 1949, Salvador Caetano fica inteiramente responsável pela sociedade, nascendo assim, a Salvador Caetano, Indústria Metalomecânica e Veículos de Transporte. Em 1955, dedicou-se exclusivamente ao fabrico de carroçarias em metal, tornando-se deste modo a primeira empresa no setor a nível europeu.

No ano de 1966, foi fundada a unidade fabril em Vila Nova de Gaia. A empresa teve um crescimento exponencial, tanto a nível nacional, como a nível internacional, salientando-se que os primeiros autocarros exportados foram para Inglaterra, no ano de 1967.

Para acompanhar este desenvolvimento, foi fundada outra unidade fabril, localizada na região de Ovar. A internacionalização do grupo foi iniciada com a criação de uma empresa em Inglaterra, para proceder à comercialização e a assistência de serviços pós-venda de autocarros. Com isto, a empresa evidenciou-se no mercado internacional, como já foi referido, conseguindo estar presente em trinta e sete países distribuída por três continentes, operando em mercados como Reino Unido e Alemanha, entre outros.

O grupo Salvador Caetano está, atualmente, dividido em três *sub-holdings*: Salvador Caetano Indústria, Salvador Caetano Auto e Salvador Caetano Capital e duas empresas

na unidade de negócio de indústria, onde se encontra a CaetanoBus – Fabricação de Carroçarias, S.A. desde 2002.

3.1.2 Apresentação da CaetanoBus

A CaetanoBus é uma empresa de referência mundial na construção de autocarros, com uma presença alargada no mercado, sendo que todo o conhecimento e desenvolvimento de carroçarias e chassis foi expandido a longo prazo. Na Figura 13 está presente as instalações da CaetanoBus, em Vila Nova de Gaia.



Figura 13-Instalações da CaetanoBus

A empresa, como entidade dinâmica, procurou e continua a procurar, sempre as melhores soluções para satisfazer o cliente e tentar acompanhar as tendências do mercado a nível internacional.

Apresentou em 2012 o primeiro autocarro com mobilidade elétrica. Com o desenvolvimento de autocarros elétricos e com a evolução dos mesmos, nos últimos anos, foi possível incorporar a tecnologia de pilha de combustível designada por *Fuel Cell* [57].

Um dos maiores feitos ocorre em 2021, quando é anunciado um *co-branding* da Caetano com a Toyota nos autocarros de mobilidade elétrica e *Fuel Cell* [58].

Apresenta-se na Tabela 21 os principais modelos de autocarros da CaetanoBus, atualmente.

Tabela 21-Autocarros da CaetanoBus [4]

Modelo	Descrição
iTrabus 	Miniautocarro, do tipo M3 classe B, com a capacidade de 31 lugares e ideal para o segmento escolar ou turístico.
Winner 	Autocarro do tipo turismo, do tipo M3 e classe B. O modelo Winner, é um modelo de veículo desenvolvido para o mercado europeu e nacional, semelhante ao modelo projetado para o mercado inglês. Este autocarro destaca-se pelo seu conforto interior, design, robustez e qualidade dos materiais.
Invictus 	Autocarro de dois pisos, do tipo M3 e classe B, desenvolvido para o transporte do maior número de passageiros em serviço de turismo. Este veículo utiliza uma carroçaria integralmente desenvolvida em alumínio.
Levante 	Autocarro desenvolvido para o mercado inglês. Veículo do tipo turismo, com um elevado nível de conforto e bons acabamentos. Este veículo possui uma rampa para passageiros com baixa mobilidade.

CityGold



Veículo desenvolvido com total foco no transporte coletivo, criando condições de acessibilidade e ergonomia que permitam a todos os passageiros uma viagem confortável. Autocarro com uma elevada referência nacional no segmento do transporte de passageiros em zona urbana.

Cobus



Autocarro desenvolvido para o transporte de passageiros em aeroporto. Com este veículo a empresa é líder mundial, na categoria de autocarros de aeroporto. Veículo desenvolvido numa elevada acessibilidade e performance.

e.CityGold



Este veículo foi desenvolvido para o mercado nacional e europeu. Veículo do tipo urbano, integralmente desenvolvido pela empresa, sendo equipado com chassis CAETANO e carroçaria desenvolvida pela empresa. Modelo 100 % elétrico desenvolvido a pensar na sustentabilidade das cidades e na necessidade de mobilidade.

H2.CityGold



Veículo integralmente desenvolvido pela CaetanoBus, uma solução de mobilidade urbana movida a hidrogénio. Autocarro desenvolvido para o transporte de passageiros em zonas urbanas.

3.2 Materiais, métodos e resultados

3.2.1 Materiais

O material de base, já foi mencionado no subcapítulo 2.2.1.1, é o aço S355J2H, onde foram especificadas todas as propriedades gerais e a composição deste material, considerando-se o mesmo um aço de construção não ligado.

O material de adição usado foi o *Weld* G3Si1 (designação do fornecedor ESAB [59]), pertencente à família dos fios de aço macio. A sua composição química está presente na Tabela 22.

Tabela 22-Composição química do fio [60]

C [%]	Mn [%]	Si [%]
0,078	1,46	0,85

Este fio sólido G3Si1, revestido de cobre, é usado no processo de soldadura MIG-MAG em todos os aços estruturais, aços de construção não ligados e aços carbono-manganês de baixa liga.

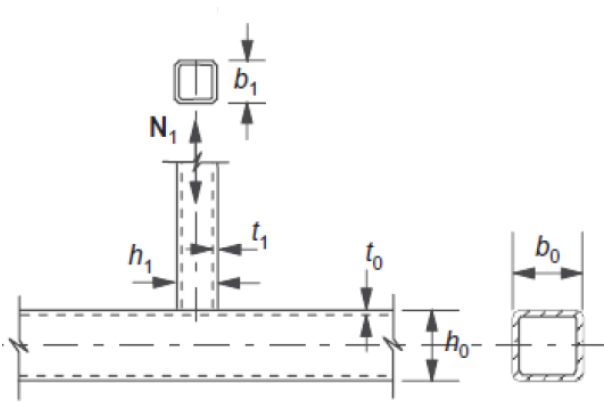
Este eletrodo pode ser soldado com recurso a uma mistura gasosa ou CO₂ puro como gás de proteção. Para esta dissertação optou-se pela utilização de uma mistura gasosa designada por M21 (designação do fornecedor *Air Products* [61]).

A M21 é uma mistura de 20% de dióxido de carbono (CO₂) e argon (Ar) formulada para soldar aços carbono e aços inoxidáveis.

3.2.2 Método analítico do caso de estudo

O caso em estudo para ter um dimensionamento que seja validado pelo EC3-1-8 [41] tem de cumprir uma série de restrições impostas pelo mesmo. A dimensão da junta tubular pretendida encontra-se na Tabela 23.

Tabela 23-Dimensões da junta tubular

	$t_0 = 3 \text{ mm}$
	$t_1 = 3 \text{ mm}$
	$h_0 = 40 \text{ mm}$
	$h_1 = 40 \text{ mm}$
	$b_0 = 40 \text{ mm}$
	$b_1 = 25 \text{ mm}$

Onde:

b_0 – Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento RHS 0;

b_1 - Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento RHS 1;

h_0 – Altura total no plano da secção transversal do elemento 0;

h_1 - Altura total no plano da secção transversal do elemento 1;

t_0 - Espessura da parede do elemento 0;

t_1 - Espessura da parede do elemento 1;

N_1 – Valor do esforço normal atuante no elemento 1.

A conformidade com a norma EN 10210, parte 1 e 2 [65][66] para o caso de perfis tubulares laminados a quente e com a norma EN 10219, parte 1 e 2 [64][65] para o caso dos perfis tubulares enformados a frio, deve ser garantida nas duas situações.

Em ambos os casos, o valor nominal da tensão de cedência não deverá exceder 460 N/mm^2 , devendo os valores de cálculo das resistências estáticas de juntas ser reduzidos por um coeficiente de 0,9 quando o valor da tensão nominal de cedência for superior a 355 N/mm^2 [41].

Quanto às limitações de geometria, deve cumprir o domínio referido na Tabela 12, salientando que a espessura nominal dos perfis tubulares deve estar compreendida entre 2,5 e 25 mm. O limite superior pode ser excedido, desde que seja garantida, através de medidas especiais, a adequabilidade das propriedades do material ao longo da espessura.

Os tipos de juntas abrangidos pela norma EC3-1-8 [41] são definidos e classificados de acordo com a configuração geométrica dos elementos ligados. Em geral, distinguem-se dois grupos:

- as juntas planas;
- as juntas tridimensionais.

Os ângulos entre a corda e os elementos diagonais, bem como os ângulos entre elementos diagonais adjacentes não deverão ser inferiores a 30° , de forma a permitir uma correta execução da soldadura.

Por fim, as secções que compõem a junta deverão ser classificadas como sendo de classe 1 ou de classe 2. A classe é definida segundo uma verificação definida pelo EC3-1-8 [41] onde as dimensões da secção do perfil são necessárias para determinar a classe.

A junta tubular em estudo cumpre os requisitos de espessura nominal, cada perfil consta com uma espessura de 3 mm e ambos são classificados como sendo classe 1. A junta pertence ao grupo das juntas planas, visto ser uma junta em T, salientando-se como imperativo, para se cumprir o requisito angular, que o ângulo entre a corda e o elemento é de 90° .

A Tabela 24 apresenta os valores calculados para verificar se estes estão dentro do domínio pretendido.

Tabela 24-Valores para validação da junta em estudo

	b_1/b_0	b_1/t_1	h_1/t_1	h_0/b_0	h_1/b_1	b_0/t_0	h_0/t_0
Junta	$(\geq 0,25)$	(≤ 35)	(≤ 35)	$(\geq 0,2 \text{ mas } \leq 2,0)$	$(\geq 0,2 \text{ mas } \leq 2,0)$	(≤ 35)	(≤ 35)
T	0,625	8,33	13,33	1,00	1,60	13,33	13,33

Perante as limitações impostas na Tabela 12, não é necessário verificar se a mesma cumpre as condições suplementares da Tabela 14, visto que essas condições são para casos de juntas com perfis quadrangulares, contudo a Tabela 25 exhibe os valores calculados para as condições suplementares.

Tabela 25-Valores para validação das condições suplementares da junta em estudo

	b_1/b_0	b_0/t_0
Junta	$(\leq 0,85)$	(≥ 10)
T	0,625	13,33

Recorrendo à Tabela 24 e Tabela 25, conclui-se que a junta tubular em estudo cumpre todas as restrições impostas pelo EC3-1-8 [41].

Com as restrições validadas, introduz-se o cálculo dos valores de esforços normais, contudo como a junta será avaliada à tração, é necessário conter algumas considerações, estando estas presentes na Equação 3.1 e Equação 3.2 e Tabela 26.

A Equação 3.1 apresenta o valor da largura efetiva da ligação do elemento ao cordão.

$$b_{eff} = \frac{10f_{y0}t_0}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)f_{y1}t_1} b_1 = \frac{10 \times 355 \times 3}{\left(\frac{40}{3}\right) \times 355 \times 3} \times 25 = 18,75 \text{ mm} \quad (3.1)$$

A Equação 3.2 apresenta o valor da largura efetiva para a resistência ao punçoamento.

$$b_{e.p} = \frac{10}{\left(\frac{b_0}{t_0}\right)} b_1 = \frac{10}{\left(\frac{40}{3}\right)} \times 25 = 18,75 \text{ mm} \quad (3.2)$$

A Tabela 26 apresenta os fatores a considerar, segundo o EC3-1-8 [41].

Tabela 26-Considerações à tração

Para a tração	
$f_b=f_{y0}$	$k_n=1,0$

Onde:

k – Fator definido no quadro apropriado, com índice g, m, n ou p;

f_{yi} – Tensão de cedência do elemento i ($i=0,1,2$ ou 3);

f_b – Resistência à encurvadura da parede lateral da corda;

Deste modo, efetua-se o cálculo dos valores de esforços normais, sendo que a Equação 3.3 apresenta o valor de cálculo de resistência que pode originar uma rotura da face de corda.

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_1} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.3)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{1 \times 355 \times 3^2}{(1 - 0,625) \sin 90} \left(\frac{2 \times 1}{\sin 90} + 4\sqrt{1 - 0,625} \right)}{1} = 37910 \text{ N}$$

A Equação 3.4 apresenta o valor de cálculo de resistência que pode originar uma encurvadura da parede lateral da corda.

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{k_n f_b t_0}{\sin \theta_1} \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.4)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{1 \times 355 \times 3}{\sin 90} \left(\frac{2 \times 40}{\sin 90} + 10 \times 3 \right)}{1} = 117150 \text{ N}$$

A Equação 3.5 apresenta o valor de cálculo de resistência que pode originar uma rotura do elemento.

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y1} t_1 (2h_1 - 5t_1 + 2b_{e.p})}{\gamma_{M5}} \quad (3.5)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 \times 3(2 \times 40 - 5 \times 3 + 2 \times 18,75)}{1} = 109163 \text{ N}$$

E por fim, a Equação 3.6 apresenta o valor de cálculo de resistência que pode originar um punçoamento.

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0}t_0}{\sqrt{3}\text{sen}\theta_1} \left(\frac{2h_1}{\text{sen}\theta_1} + 2b_{e.p} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.6)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{355 \times 3}{\sqrt{3} \text{sen } 90} \left(\frac{2 \times 40}{\text{sen } 90} + 2 \times 18,75 \right)}{1} = 72248 \text{ N}$$

Após efetuar os cálculos dos esforços normais, é necessário verificar a resistência à flexão da junta, tanto para o plano como para fora do mesmo.

A Equação 3.7 exibe o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode originar uma rotura por face da corda.

A Equação 3.7, Equação 3.8 e Equação 3.9 são os cálculos para a resistência à flexão da junta no plano.

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.7)$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{1 \times 355 \times 3^2 \times 40 \left(\frac{1}{2 \times 1} + \frac{2}{\sqrt{1 - 0,625}} + \frac{1}{1 - 0,625} \right)}{1} = 822093 \text{ N.mm}$$

A Equação 3.8 apresenta o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode originar um esmagamento da parede lateral da corda.

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 f_{yk} t_0 (h_1 + 5t_0)^2}{\gamma_{M5}} \quad (3.8)$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{0,5 \times 355 \times 3(40 + 5 \times 3)^2}{1} = 1610810 \text{ N.mm}$$

A Equação 3.9 expõe o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode provocar uma rotura do elemento.

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right) b_1 (h_1 - t_1) t_1 \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.9)$$

$$M_{ip,1,Rd} = \frac{355 \left(2330 - \left(1 - \frac{18,75}{25} \right) \times 25(40 - 3) \times 3 \right)}{1} = 580869 \text{ N.mm}$$

A Equação 3.10, Equação 3.11, Equação 3.12 e Equação 3.13 são os cálculos para a resistência à flexão da junta fora do plano.

A Equação 3.10 exhibe o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode provocar uma rotura da face da corda.

$$M_{op,1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{h_1(1+\beta)}{2(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2b_0b_1(1+\beta)}{1-\beta}} \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} M_{op,1,Rd} &= \frac{1 \times 355 \times 3^2 \left(\frac{40(1+0,625)}{2(1-0,625)} + \sqrt{\frac{2 \times 40 \times 25(1+0,625)}{1-0,625}} \right)}{1} \\ &= 574338 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

A Equação 3.11 apresenta o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode originar um esmagamento da parede lateral da corda.

$$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{yk} t_0 (b_0 - t_0) (h_1 + 5t_0)}{\gamma_{M5}} \quad (3.11)$$

$$M_{op,1,Rd} = \frac{355 \times 3(40 - 3)(40 + 5 \times 3)}{1} = 2167275 \text{ N.mm}$$

A Equação 3.12 expõe o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode provocar uma distorção da corda.

$$M_{op,1,Rd} = \frac{2f_{y0} t_0 (h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0 t_0 (b_0 + h_0)})}{\gamma_{M5}} \quad (3.12)$$

$$M_{op,1,Rd} = \frac{2 \times 355 \times 3(40 \times 3 + \sqrt{40 \times 40 \times 3(40 + 40)})}{1} = 1575510 \text{ N.mm}$$

Para terminar, a Equação 3.13 apresenta o valor de cálculo de resistência da junta à flexão que pode originar uma rotura do elemento.

$$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{y1} \left(W_{pl,1} - 0,5 \left(1 - \frac{b_{eff}}{b_1} \right)^2 b_1^2 t_1 \right)}{\gamma_{M5}} \quad (3.13)$$

$$M_{op,1,Rd} = \frac{355 \left(2330 - 0,5 \left(1 - \frac{18,75}{25} \right)^2 \times 25^2 \times 3 \right)}{1} = 806349 \text{ N.mm}$$

Deste modo, todos os esforços normais e de flexão foram efetuados e para que haja a verificação da junta segundo o EC3-1-8 [41] é necessário que a combinação de esforço normal e de momentos fletores satisfaça a Equação 3.14.

Como no caso de estudo só irá ser efetuado o ensaio à tração e flexão dentro do plano, todos os momentos fletores fora do plano serão desprezados.

$$\frac{N_{i,Ed}}{37910} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{580869} \leq 1,0 \quad (3.14)$$

Sucintamente, a junta tubular em estudo é válida segundo o EC3-1-8 [41], para um esforço axial máximo de 37910 N ou para um momento fletor dentro do plano máximo de 580869 N.mm.

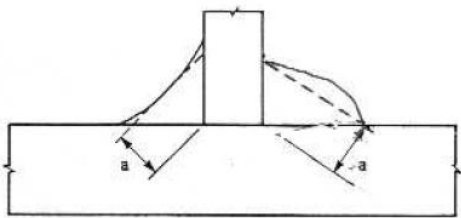
Após o dimensionamento da junta em estudo ser verificado, o dimensionamento da soldadura também exige uma verificação, segundo o EC3-1-8 [41].

Existem algumas restrições a observar utilizar, tais como:

- o ângulo de soldadura terá de estar compreendido entre 60° e 120°, se o objetivo for efetuar uma soldadura de ângulo;
- o comprimento efetivo do cordão de ângulo deverá ser considerado igual ao comprimento em que o cordão tem a sua secção completa, salientando que o comprimento efetivo não deverá ser inferior a 30 mm ou 6 vezes a espessura do perfil da junta, considerando-se o maior destes valores;
- a espessura efetiva do cordão de ângulo não deverá ser inferior a 3 mm.

A Tabela 27 apresenta a espessura efetiva do cordão a usar e fatores que serão inseridos nos cálculos a efetuar.

Tabela 27-Dimensão do cordão e fatores do aço S355

	$a = 5 \text{ mm}$
	$\beta_w = 0,9$
	$f_u = 510 \text{ MPa}$
	$\gamma_{Mw} = 1,25$

Onde:

a – Espessura efetiva do cordão de ângulo;

β_w – Fator de correlação para soldaduras de ângulo;

f_u – Valor nominal da tensão de rotura à tração da peça ligada mais fraca;

γ_{Mw} -Coeficiente parcial de segurança para a ligação.

A Equação 3.15 apresenta o valor de cálculo da resistência ao corte da soldadura.

$$f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{510/\sqrt{3}}{0,9 \times 1,25} = 261,732 \text{ N/mm}^2 \quad (3.15)$$

De seguida, efetua-se o cálculo da resistência por unidade de comprimento exposto na Equação 3.16.

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d}a = 261,732 \times 5 = 1308,66 \text{ N/mm} \quad (3.16)$$

Por fim, a Tabela 28 exhibe os valores dos esforços por unidade de comprimento segundo a junta tubular em estudo.

Tabela 28-Esforços da junta em estudo por unidade de comprimento

L_{eff}	$F_{w,Rd}$
25 mm	32716,5 N
40 mm	52346,4 N

Como resultado, o esforço máximo suportado pela soldadura efetuada na junta é de 32716,5 N.

3.2.3 Simulação do caso de estudo

3.2.3.1 Condições de análise numérica

A análise numérica realizada teve como base o *software* ANSYS 2020 R2 [3]. Este *software* baseia-se no método de Elementos Finitos e a sua escolha recai pela gama completa de ferramentas de análises.

Os perfis tubulares foram modelados em CAD, usando o *software* Solidworks [66], e inseridos no *software* de simulação.

No *software* ANSYS 2020 R2 [3] começou-se por atribuir os materiais aos perfis.

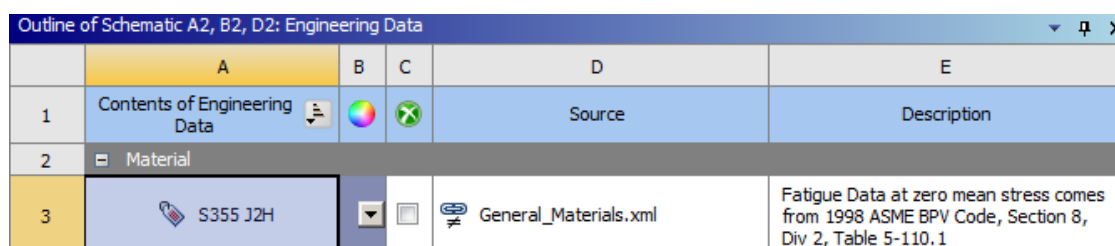


Figura 14-Atribuição dos materiais aos perfis tubulares

De seguida, foi definida a geometria a usar, devido a ser um elemento com uma espessura relativamente pequena comparada à dimensão do perfil, salientado que as forças de carga a que estará sujeito são paralelas ao perfil, ou seja, estamos perante um estado plano de tensão.

Neste contexto, optou-se por efetuar a simulação com a geometria em cascas, somente para as juntas tubulares, fundamentando que o não uso de filete de perfil não altera os resultados das simulações significativamente, segundo estudos de Mendanha [67] e Mendes [68].

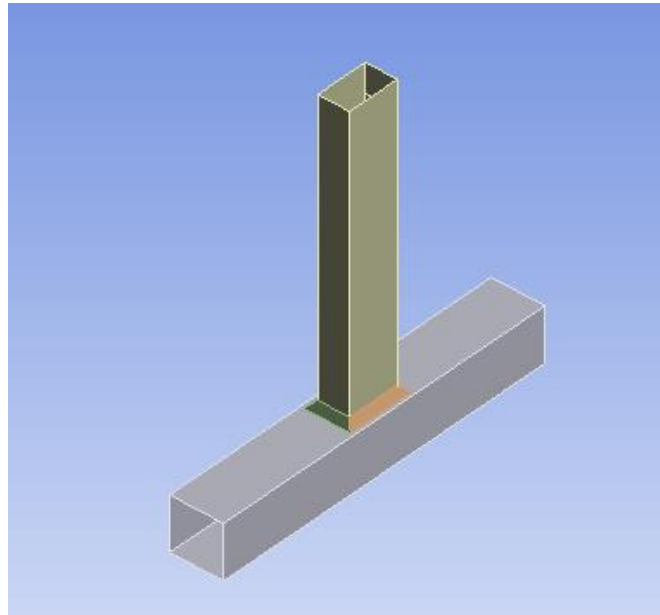


Figura 15-Geometria em cascas

Para a análise numérica foi considerado o uso de elementos quadráticos, sendo que estes utilizam uma função de forma não-linear, em que os deslocamentos entre os nós são interpolados usando um polinómio de ordem superior, ou seja, o resultado será mais fidedigno.

A malha aplicada nos perfis tubulares tem um tamanho de elemento no qual, foi realizado um estudo de convergência da malha para obter o tamanho a utilizar. Para realizar esse mesmo estudo foi necessário definir as condições fronteira no *software* de simulação numérica apresentando as mesmas na Página 68.

A Tabela 29 apresenta os dados retirados do *software* ANSYS 2020 R2 [3], segundo simulações efetuadas com diferentes tamanhos do elemento ao modelo apresentado na Figura 15.

Tabela 29-Dados para convergência da malha

Tamanho do elemento [mm]	Número de elementos	Tensão [MPa]	Deslocamento [mm]
30	117	2403,2	6,32
25	166	2178,9	6,75
20	204	2111,4	6,69
18	222	2132,5	6,72
16	248	2140,5	6,58
14	400	2012,5	7,55
12	472	2043,5	7,78
10	703	1946,8	7,47
8	1091	1900,4	8,03
6	1739	1875,4	8,04
5	2362	1875,5	7,87
4	3880	1872,8	8,17
3	6748	1862,8	8,04
2,5	10066	1844,3	8,10

Com os valores da Tabela 29 cria-se a Figura 16 e Figura 17.

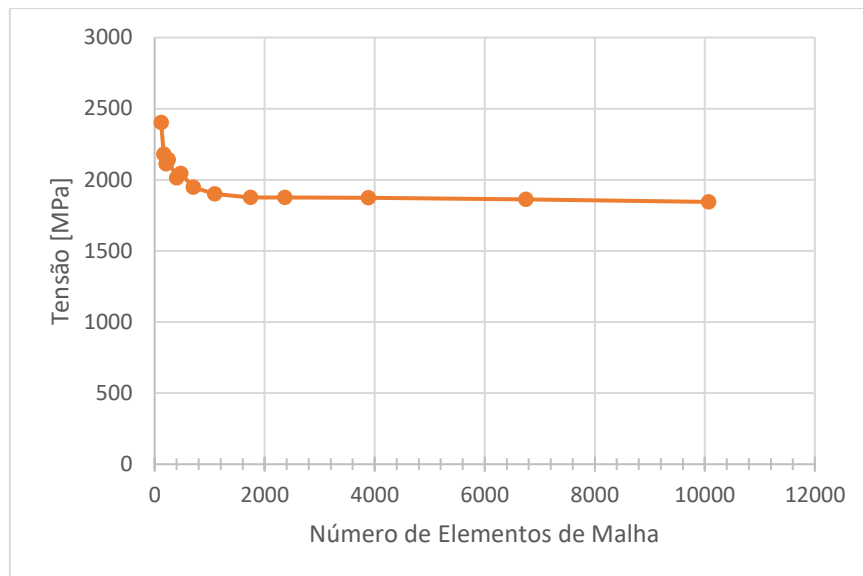


Figura 16-Tensão de von Mises em função do número de elementos de malha

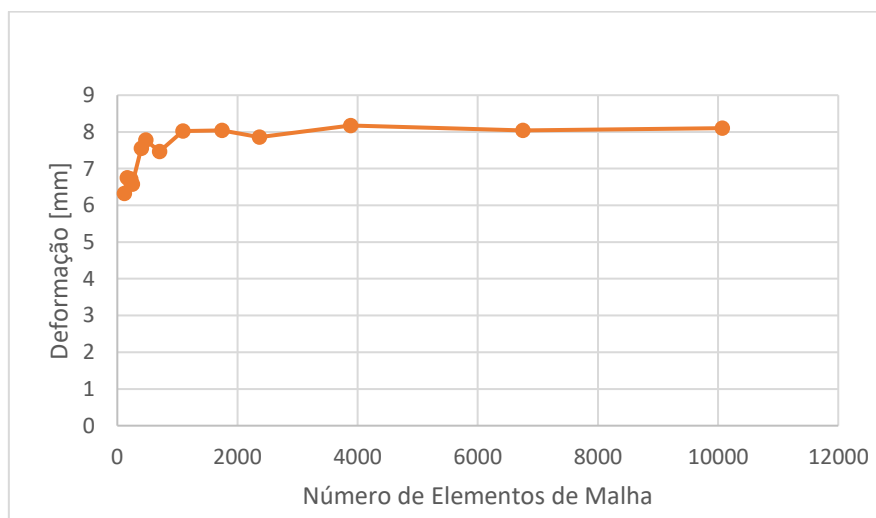


Figura 17-Deslocamento em função do número de elementos de malha

Em suma, recorrendo à Figura 16 e Figura 17 é notório que existe uma tendência, ou seja, não existem alterações bruscas de geometria. Neste âmbito, não existem singularidades nos gráficos.

A Tabela 30 exhibe a malha adotada para as análises futuras.

Tabela 30-Malha adotada para simulações a efetuar

Tamanho do elemento [mm]	Número de nós	Número de elementos
3	5243	6748

O objetivo de realizar um estudo de convergência da malha baseou-se na busca da diminuição do erro numérico, procurando uma malha com melhor qualidade e que não fosse necessitar de grandes recursos computacionais.

Deste modo aplicamos ferramentas à malha de forma a reduzir mais o poder computacional, obtendo de forma semelhante os resultados que necessitamos, com o menor erro numérico possível.

Assim, para a zona mais crítica, aplicou-se uma ferramenta designada por *Body Sizing* que possibilita o controlo do refinamento da malha localizado, neste particular, na zona onde ocorre a união dos dois perfis tubulares, com um raio de esfera de influência de 40 mm, onde todas as cascas no interior dessa esfera ficarão com um tamanho de elemento de 3 mm, de acordo com o estudo que foi efetuado.

Fora da região selecionada será utilizada um tamanho de elemento de 6 mm.

A Figura 18 e Figura 19 exibem as condições efetuadas na malha.

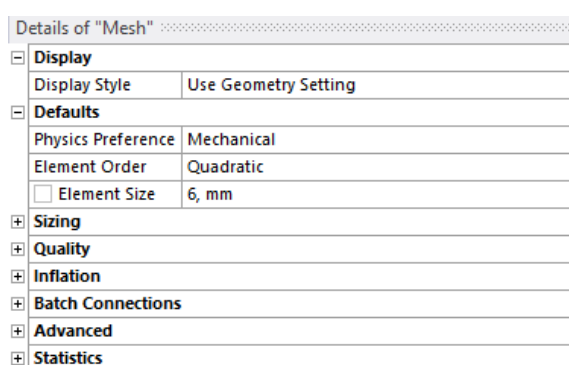
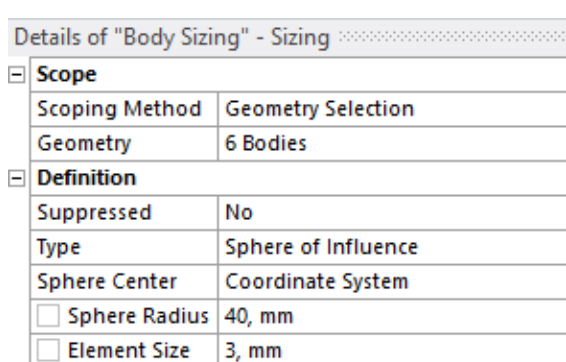


Figura 18-Detalhes da malha

Figura 19-Detalhes do *Body Sizing*

Por fim, gera-se a malha obtendo o resultado apresentado na Figura 20.

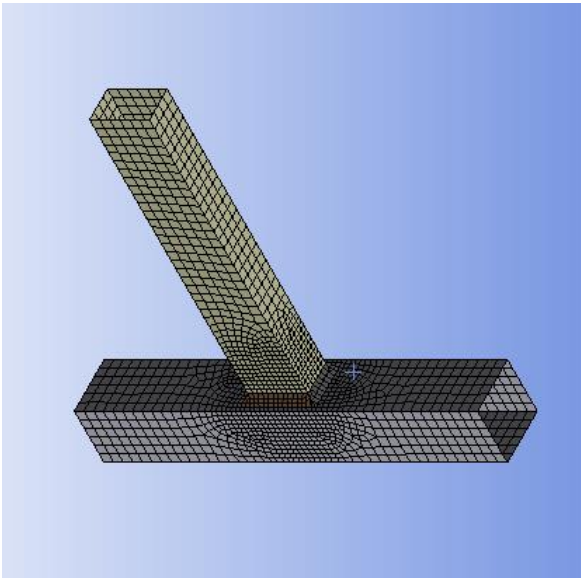
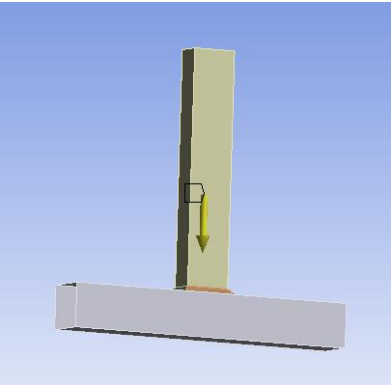
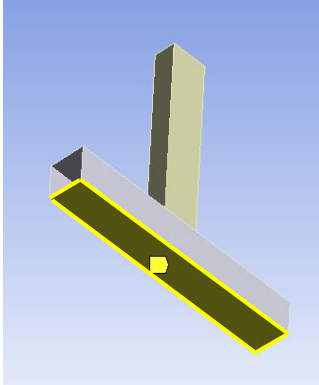
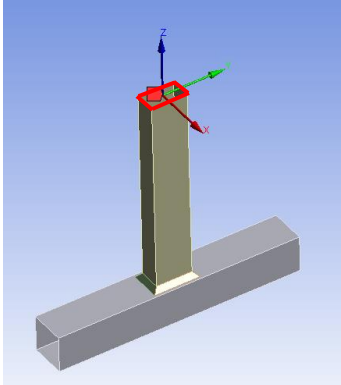


Figura 20-Malha gerada

Após a criação da malha ser realizada, começa-se por atribuir ao modelo as condições fronteira apresentadas na Tabela 31.

Tabela 31-Condições fronteira para simulação

Força da Gravidade	Deslocamento Remoto	Força Remota
		

Realçar que a zona de fixação da junta está representada a amarelo na Tabela 31.
Deste modo, é possível efetuar a simulação do modelo em estudo.

3.2.3.2 Análise numérica do caso de estudo

Para abordar o caso de estudo simulou-se o mesmo modelo em duas situações de carga distintas, uma simulação à tração e uma simulação à flexão. As tensões obtidas ao longo das simulações são tensões de *von Mises*.

As condições fronteira, em ambas as simulações, estão explícitas no subcapítulo 3.2.3.1.

Para o caso do modelo em estudo estar a ser tracionado foi aplicado uma força axial de 37910 N. Relativamente ao caso do modelo em estudo estar a sofrer flexão foi aplicada uma força de 2765 N. As forças foram aplicadas de acordo com os resultados obtidos no cálculo teóricos dos esforços segundo o Eurocódigo, para o esforço normal aplicou-se 37910 N obtido através dos cálculos e para o esforço de flexão dentro do plano aplicou-se a força 2765 N ($M_{ip,i,Ed} = 210 \times 2765 = 580650 \text{ N.m}$) que gerará o momento calculado.

A Figura 21 apresenta o modelo simulado com uma força aplicada de 37910 N.

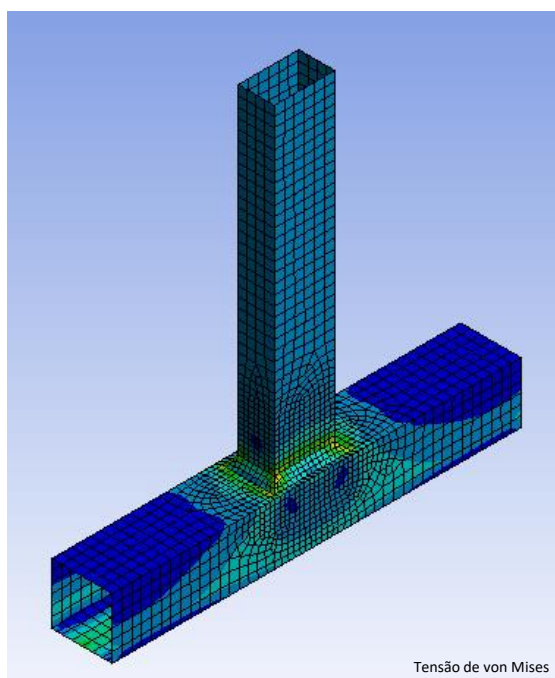


Figura 21-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo em estudo

A Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam a zona de ligação soldada pormenorizada e os resultados de tensão obtidos.

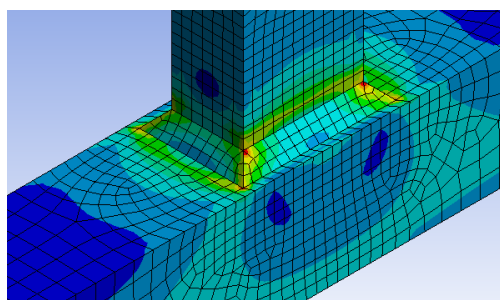


Figura 22-Pormenor da zona de ligação
(Escala Real 1.0x)

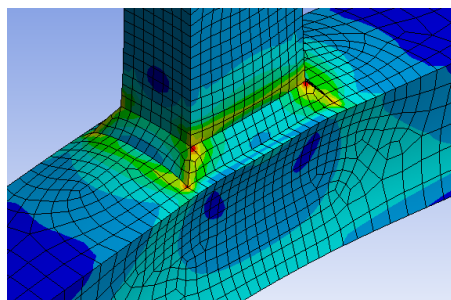


Figura 23-Pormenor da zona de ligação
(Escala Automática 54.0x)

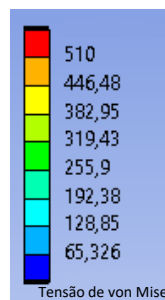


Figura 24-
Tensão [MPa]

Para o caso do modelo em estudo que está a sofrer flexão foi aplicado uma força de 2765 N que gere um momento fletor de 580,65 N.m, valor este aproximado ao calculado teoricamente segundo o EC3-1-8 [41].

A Figura 25 exhibe o modelo simulado com uma força aplicada de 2765 N.

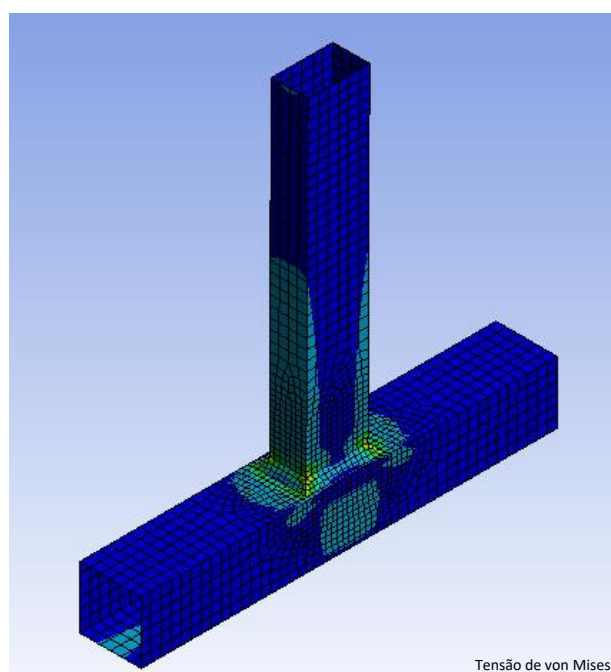


Figura 25-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo em estudo

A Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresentam a zona de ligação soldada pormenorizada e os resultados de tensão obtidos.

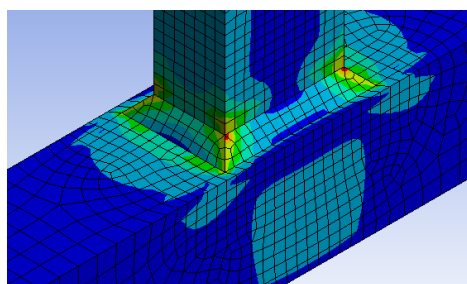


Figura 26-Pormenor da zona de ligação
(Escala Real 1.0x)

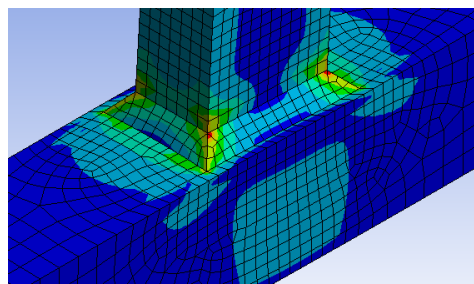


Figura 27-Pormenor da zona de ligação
(Escala Automática 16.0x)

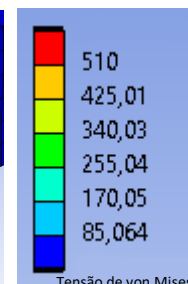


Figura 28-Tensão
[MPa]

Através da análise das figuras anteriores verifica-se existir, na zona de ligação entre os perfis tubulares, uma elevada concentração de tensões, onde a tensão de cedência é largamente excedida.

Para este tipo de situações, o material entra em cedência e plastifica, entrando em regime plástico, tornando-se numa situação não favorável, considerando-se que nas ligações de estruturas de veículos pesados de passageiros existem cargas dinâmicas.

Deste modo, com a presença de um ponto em que seja atingida a tensão de cedência, este facto leva a que ocorra uma deformação plástica, que poderá progredir para a rotura da ligação.

Em suma, o EC3-1-8 [41] sugere para esta ligação valores de carga a aplicar para estados limites últimos, em que a tensão de cedência do material é superada.

3.2.4 Método experimental do caso de estudo

3.2.4.1 Procedimento experimental

A análise experimental foi realizada com dois ensaios distintos, contudo foi necessário desenvolver ferramentas para a máquina de ensaios.

Antes do procedimento de corte do perfil tubular e da soldadura a executar, foram feitos estudos relativos ao ensaio de tração e de flexão. Esta situação, deve-se ao facto de não existirem ferramentas compatíveis para o nosso modelo em estudo.

Para o ensaio de tração foi ponderado executar um furo no perfil vertical da junta para conseguir passar um pino pelo mesmo de modo a prender na garra da máquina.

Contudo, para a junta tubular ficar fixa à base da máquina analisou-se a criação de um suporte, soldando o mesmo à junta e aparafusando-o a outra peça que estará aparafusada à máquina. A Figura 29 apresenta o conceito explicado, sem a representação da máquina de ensaio.

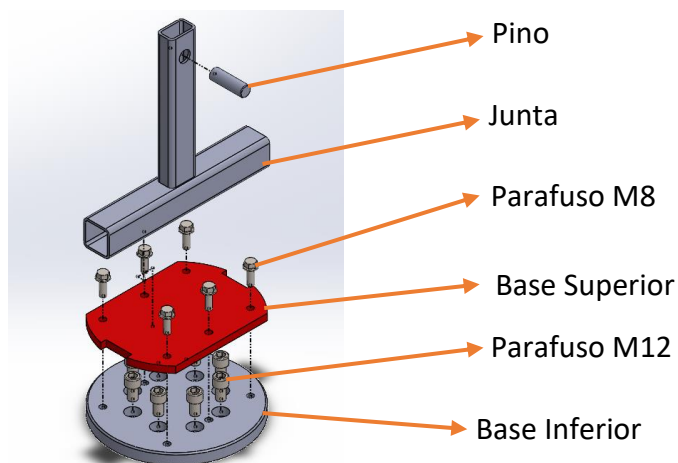


Figura 29-Ferramenta para ensaio de tração em vista explodida legendada

Para certificar que a ferramenta idealizada para o ensaio de tração está adequada foi realizado uma simulação no *software* ANSYS 2020 R2 [3] para verificar se o modelo em estudo não ia criar uma rotura na zona de contacto entre o pino e o furo efetuado, visto que nessa zona existe uma elevada concentração de tensões originado pelo furo e irá haver um forte esmagamento no decorrer do ensaio. A Figura 30 exhibe a simulação efetuada.

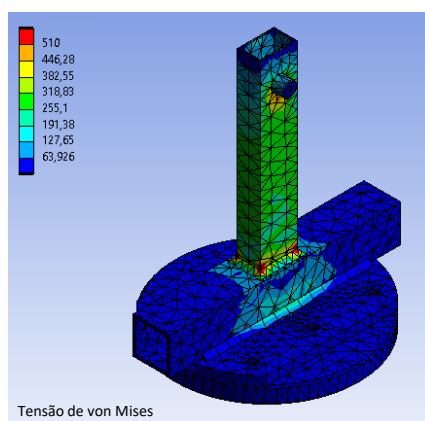


Figura 30-Simulação da ferramenta de tração [MPa]

Deste modo, conclui-se que na zona da união soldada irá existir maior tensão, sendo considera uma das zonas críticas da ligação. Pode, no entanto, ser necessário inserir chapas de reforço na junta tubular em estudo na zona do furo.

A soldadura executada entre uma das peças do suporte e a junta não carece de verificação, porque o comprimento do cordão de soldadura entre o suporte e a junta é maior que o cordão de soldadura executado entre os perfis, contendo ambos a mesma espessura efetiva. Desta forma a rotura não ocorrerá na ligação entre a junta e a base da ferramenta. De facto, de acordo com a simulação, a rotura irá ocorrer na ligação entre os perfis tubulares (zona onde a tensão instalada é mais elevada). Ou seja, a rotura irá ocorrer na zona de interesse, pelo que podemos considerar que a ferramenta está validada para a realização do ensaio de tração da junta. Contudo, a zona do furo, onde está alojado o pino para a aplicação da força de ensaio, também é fortemente solicitada podendo, assim, a rotura ocorrer nesta zona.

Quanto ao ensaio de flexão foi necessário executar uma base de aperto para fixar a junta e poder realizar o mesmo, construindo toda a base com espessuras elevadas de modo a suportar o esforço exercido no ensaio sobre a junta. A Figura 31 apresenta a base de aperto sem a máquina de ensaio.

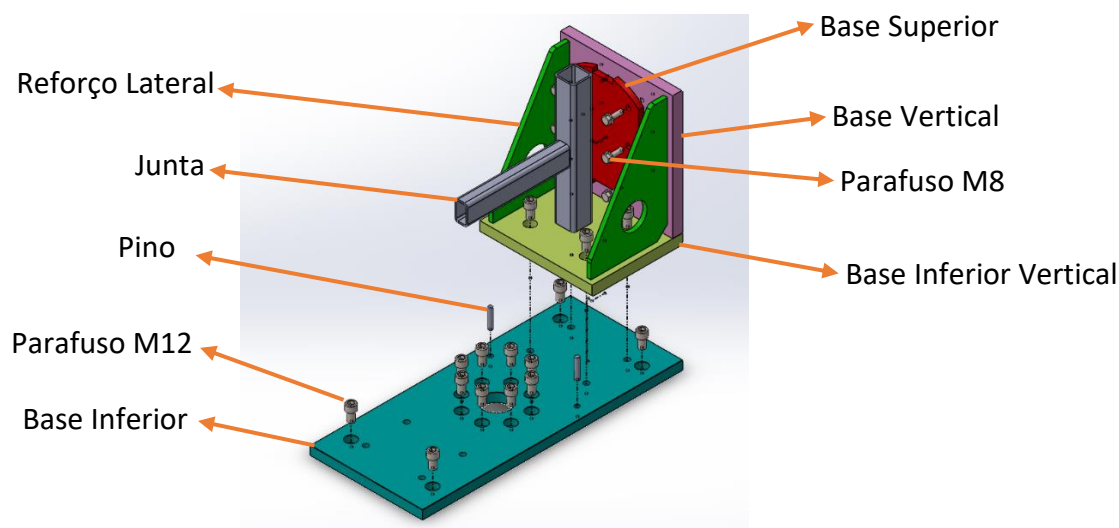


Figura 31-Ferramenta para ensaio de flexão em vista explodida legendada

Para certificar que a ferramenta idealizada para o ensaio de flexão está adequada foi realizada uma simulação no *software* ANSYS 2020 R2 [3] representada na Figura 32.

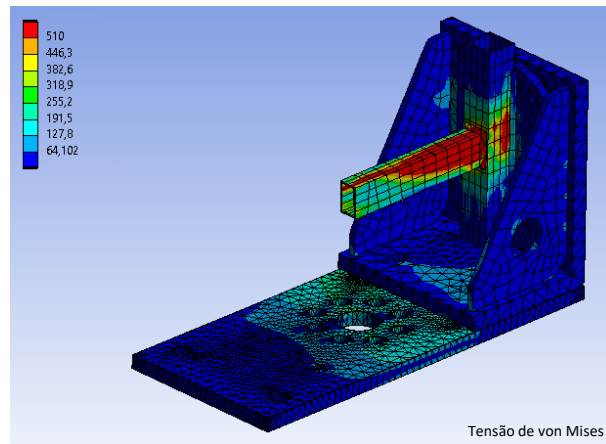


Figura 32-Simulação da ferramenta de flexão [MPa]

Com isto, constata-se que a base de aperto suportará os esforços, estando assim validada para o ensaio de flexão.

Com as ferramentas estudadas e validadas procedeu-se ao fabrico das mesmas para executar os respetivos ensaios. Frisar que os desenhos técnicos das ferramentas estão presentes nos anexos, mais precisamente no subcapítulo 6.1.

A Figura 33 e Figura 34 exibem as ferramentas com as respetivas juntas prontas para os ensaios de tração e de flexão.

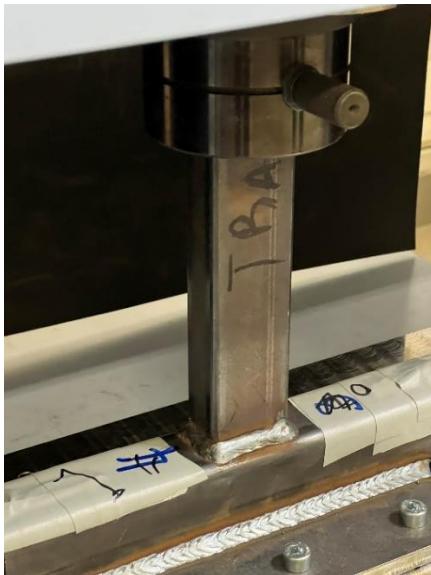


Figura 33-Ferramenta para ensaio de tração



Figura 34-Ferramenta para ensaio de flexão

O fabrico das juntas tubulares em T iniciou-se pelo corte de seis tubos de perfil S355J2H. Três desses tubos foram cortados com um comprimento de 210 mm e com uma secção de 40x25x3 mm. Os outros três tubos foram cortados com um comprimento de 250 mm e apresentavam uma secção de 40x40x3 mm.

A Figura 35 expõe a máquina onde foram cortados os tubos.



Figura 35-Máquina de corte

Em seguida, foi efetuada a soldadura para criar a união entre os perfis tubulares originando a junta em T apresentada na Figura 36.



Figura 36-Junta em T fabricada para ensaios

Após a junta em T estar fabricada, foi soldada à base da ferramenta e posteriormente foram aplicados extensômetros para obter as deformações durante a realização dos ensaios, isto é, extensômetros uniaxiais da HBM [69] com uma resistência de $120\ \Omega$ com um fator de medição de 1,98. Os valores das deformações obtidas nos ensaios, realizando a multiplicação pelo módulo de *Young* obtemos os valores das tensões.

Deste modo, começou-se por identificar o local a instrumentar cada junta. Posteriormente lixou-se o local a instrumentar com uma lixa de granulometria 100, numa primeira fase, para eliminar defeitos de superfície resultantes do manuseio ou do processo de fabrico. Numa segunda fase lixou-se a superfície com uma lixa de granulometria 180, de forma a melhorar o acabamento superficial.

A Figura 37 apresenta as lixas e a Figura 38 demonstra um pouco do processo de desbaste. Na Figura 38 as juntas em T já estão soldadas à base que faz parte das ferramentas para os ensaios de tração e de flexão.

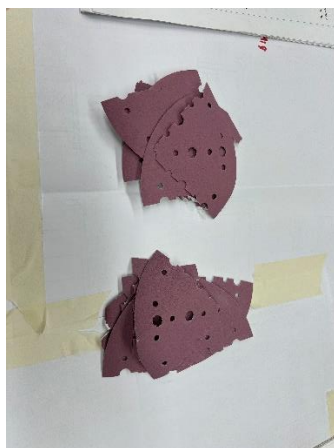


Figura 37-Lixas de granulometria

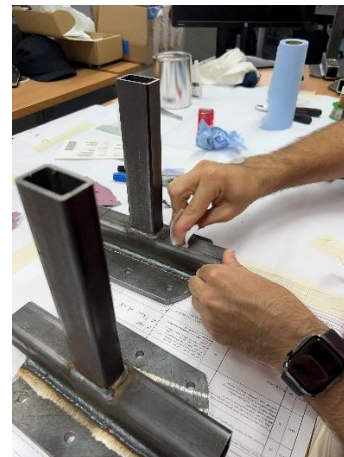


Figura 38-Desbaste da zona a instrumentar

Após a lixagem das superfícies (Figura 39) efetuou-se uma limpeza com acetona para eliminar todos os pontos de gordura e de partículas provenientes da lixagem. Seguidamente, estabeleceu-se o local exato onde o extensómetro irá ser aplicado estando este no centro do perfil, a 55 mm de distância da ponta do perfil tubular.

A Figura 40 exhibe a marcação do local onde o extensómetro foi aplicado.



Figura 39-Desbaste concluído



Figura 40-Local exato para aplicação do extensômetro

De seguida coloca-se o extensómetro numa superfície limpa de modo a garantir que a parte opaca do mesmo fique voltada para baixo. Logo após, coloca-se fita-cola no extensómetro e na superfície, de forma a conseguir um manuseio mais preciso do mesmo, facilitando posteriormente o processo de colagem.

Da mesma forma que se marcou as direções na junta, efetua-se o mesmo na fita-cola para posteriormente se afinar o posicionamento na junta.

A Figura 41 e Figura 42 apresentam o extensómetro colocado na placa de vidro com as marcações efetuadas para futuro posicionamento na junta tubular.



Figura 41-Extensómetro colocado em uma placa de vidro

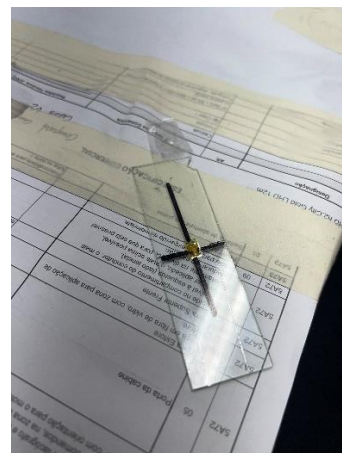


Figura 42-Extensómetro colado e marcado em uma placa de vidro

Concluída a preparação do extensómetro, procede-se a uma descolagem cuidadosa do extensómetro da placa de vidro transitando o mesmo para a junta tubular. Com todas as marcações efetuadas anteriormente, o posicionamento do mesmo fica muito mais facilitado de modo a realizar a colagem.

A Figura 43 apresenta a aplicação da cola para fixar o extensómetro na junta. Após inserir a cola realiza-se uma pressão sob o extensómetro durante 60 segundos para o mesmo fixar permanentemente, como demonstra a Figura 44.



Figura 43-Processo de colagem do extensómetro
(Descolagem da fita-cola e aplicação de cola)



Figura 44-Processo de colagem do extensómetro
(Pressão)

Executada a pressão e retirada a fita-cola o extensómetro fica aplicado na junta como apresentado na Figura 45.



Figura 45-Extensómetro aplicado na junta

Deste modo, procedeu-se a estanhagem dos fios e dos terminais do extensómetro de forma a facilitar a ligação entre os fios elétricos e os terminais.

A Figura 46 exibe a estanhagem dos fios elétricos e a Figura 47 apresenta a estanhagem dos terminais do extensómetro.



Figura 46-Estanhagem dos fios elétricos



Figura 47-Estanhagem dos terminais do extensómetro

Com a estanhagem concluída sucede-se o posicionamento dos fios elétricos. Estes são alinhados com os terminais e prendidos com fita-cola para não ocorrer movimentos dos mesmos. São cortadas as pontas dos fios de forma a ter o menor comprimento possível e por fim realiza-se a soldagem dos fios aos terminais cuidadosamente para não unir os dois terminais ou para não furar o extensómetro com o excesso de calor.

A Figura 48 mostra o momento de solda e a Figura 49 apresenta o extensómetro colocado no local definido com os fios elétricos soldados aos terminais do extensómetro.



Figura 48-Solda entre os fios e o extensómetro

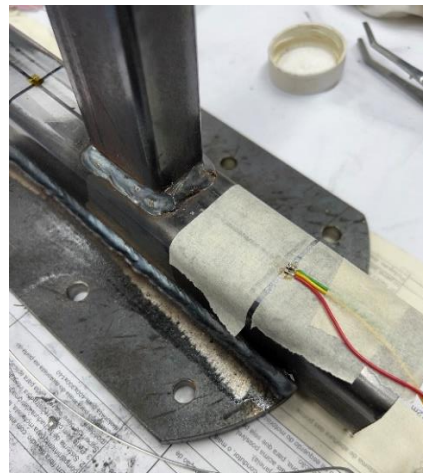


Figura 49-Extensómetro aplicado com fios elétricos

Seguidamente, foi realizada a medição do extensómetro de modo a concluir se a resistência medida é idêntica ao valor da resistência do extensómetro. Igualmente, também é necessária a medição da condutividade entre terminais e a peça para garantir que não se danificou o extensómetro.

Obtendo os valores esperados constata-se que o extensómetro está bem aplicado e adequado para realizar as respetivas medições.

De seguida isola-se os fios para garantir que não há risco destes se desconectarem com os terminais do extensómetro e isola-se a ligação, estando um exemplo representado na Figura 50.



Figura 50-Extensómetro isolado e finalizado

Para obter os dados dos extensômetros é necessário efetuar um *set-up* e uma preparação computacional. A realização do *set-up* baseia-se na conexão dos fios elétricos ao módulo NI 9235, estando este processo presente na Figura 51. A preparação computacional assenta no uso de dois *softwares*, um para verificar a conexão entre os sensores e o chassis NI, cujo software intitula-se por *NI MAX*.

O segundo *software* é o *LabView SignalExpress*, servindo este para inserir todos os dados dos extensômetros, calibrar os mesmos e por fim retirar os dados desejados.

A Figura 52 apresenta o uso computacional necessário para o funcionamento dos extensômetros.



Figura 51-Conexão fios elétricos ao módulo NI 9235



Figura 52-Uso computacional para ligar extensômetros

Resumidamente, a Figura 53 expõe toda a ligação realizada para obter dados dos extensômetros.



Figura 53-Ligação desde a junta até ao computador

Assim sendo, os ensaios podem ser realizados, visto que todo o processo essencial e ferramentas necessárias estão aptas para efetuar os ensaios. Os ensaios serão realizados recorrendo à máquina *Shimadzu Autograph AG-X 100 kN* que permanece no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

3.2.4.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um ensaio universal devido à facilidade de execução e reprodutibilidade de resultados. Neste trabalho o ensaio foi realizado numa junta tubular em T e a fixação da junta na máquina de ensaios pode ser observada nas figuras seguintes (Figura 54 e Figura 55). A força foi aplicada no perfil vertical através de um pino que passa pelo furo realizado no perfil tubular.



Figura 54-Ensaio de tração

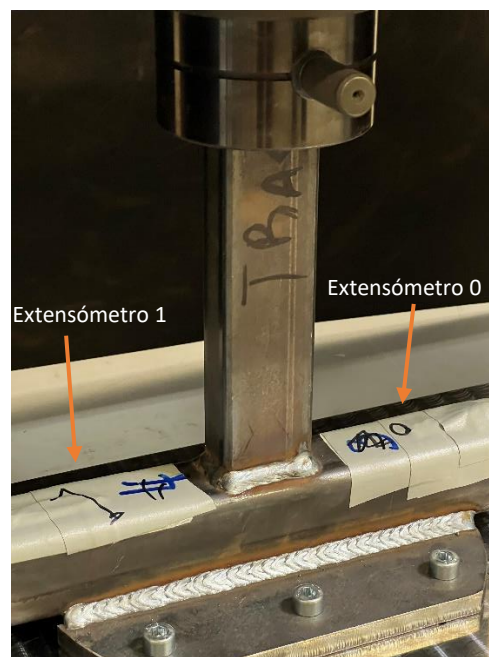


Figura 55-Ensaio de tração (Vista aproximada)

Para o ensaio de tração foi usada apenas uma junta devidamente instrumentada. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 5 mm/min.

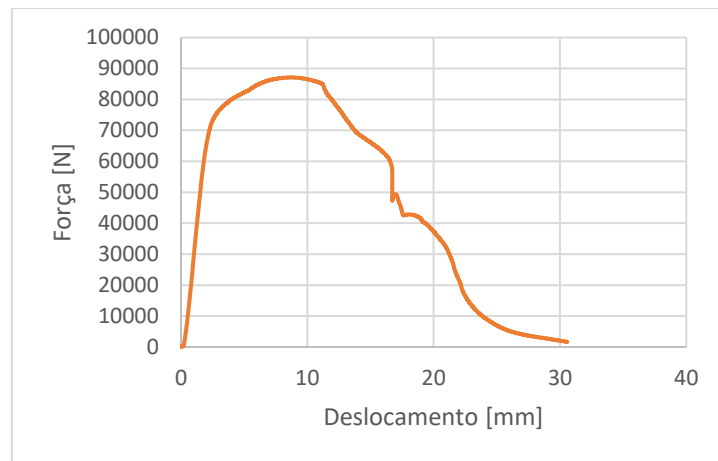


Figura 56-Força vs Deslocamento (Ensaio de tração com junta instrumentada)

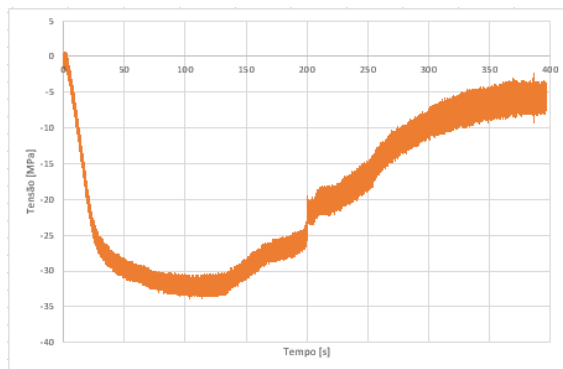


Figura 57-Extensómetro 0 (Tensão vs Tempo)

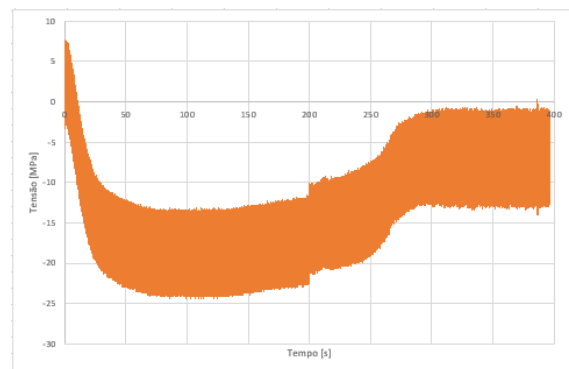


Figura 58-Extensómetro 1 (Tensão vs Tempo)

Observando a Figura 56 é perceptível que a junta atingiu uma rotura. A força máxima que foi atingida neste ensaio ronda os 87090 N.

Os dados que foram retirados dos extensómetros geraram gráficos com elevado ruído porque não se efetuou a ligação à massa, contudo no extensómetro 0 (Figura 57) obteve-se o valor de 32,60 MPa e no extensómetro 1 (Figura 58) retirou-se o valor de 15,28 MPa, ambos os valores foram retirados quando se atingiu a força máxima no ensaio.

A junta tubular após ser ensaiada ficou com uma rotura visível e com fissuras na união soldada.

A Figura 59 e Figura 60 apresentam os resultados práticos obtidos.



Figura 59-Zona de rotura (Ensaio de tração)



Figura 60-União soldada com fissura (Ensaio de tração)

Em suma, mediante a Figura 59 percebe-se que a rotura ocorreu numa zona que não era desejada, era necessário o reforço na zona do furo para ser possível realizar o ensaio e estudar a ligação soldada, algo que se tinha previsto anteriormente.

Deste modo, os valores retirados dos extensómetros não são os mais fidedignos, porque as tensões não se distribuíram da forma desejada, sendo impossível fazer comparação de valores práticos para valores simulados. Contudo, da análise da Figura 60 repara-se que na zona da soldadura surgiu uma fissura, zona esta que se denomina por zona termicamente afetada. Mais uma vez, a simulação efetuada anteriormente previu que as fissuras iriam ocorrer, contudo não havia certezas que o furo realizado ia resistir ao forte esmagamento durante o ensaio, acabando por constatar-se que era necessário o reforço na zona do furo para que a rotura ocorresse na zona em estudo, isto é, na união soldada.

3.2.4.3 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é um dos principais ensaios mecânicos para o controlo de qualidade e avaliação do desempenho dos materiais sob este tipo de solicitação e também para juntas soldadas. Para este caso, o objetivo é determinar as propriedades de resistência à flexão e obter informação sobre o comportamento da junta.

A Figura 61 e Figura 62 expõem as juntas tubulares prontas para realizar o ensaio, salientando que para este caso foram ensaiadas duas juntas, uma sem instrumentação (Figura 61) e outra com instrumentação (Figura 62).



Figura 61-Ensaio de flexão de junta sem instrumentação



Figura 62-Ensaio de flexão de junta com instrumentação

Para o ensaio de flexão foram usadas duas juntas tubulares, como já foi mencionado anteriormente, e a velocidade utilizada para o ensaio foi de 5 mm/min.

A primeira junta para a realização do ensaio de flexão foi a junta sem instrumentação, assim sendo, a Figura 63 apresenta a relação entre a força e o deslocamento ao longo do ensaio.

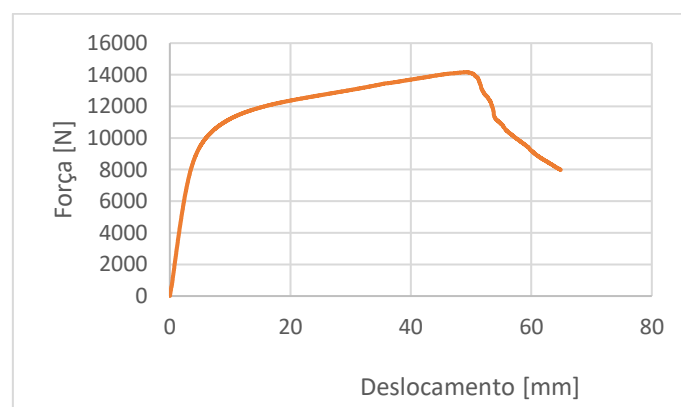


Figura 63-Força vs Deslocamento (Ensaio de flexão com junta não instrumentada)

Visualizando a Figura 63 consegue-se detetar que existiu uma alteração drástica na força realizada, por conseguinte é perceptível que a força máxima que o ensaio atingiu foi 14161 N e, para esse instante, o deslocamento obtido foi de 49,26 mm.

A Figura 64 e Figura 65 demonstram a deformação atingida.



Figura 64-Junta após ensaio (Ensaio de flexão com junta não instrumentada)



Figura 65-Fissura pormenorizada (Ensaio de flexão com junta não instrumentada)

Em síntese, a Figura 64 permite constatar que o perfil tubular fixo na corda sofreu uma acentuada deformação plástica. Na Figura 65 é possível observar a rotura junto do cordão de soldadura.

Assim sendo, avançou-se para o ensaio de flexão da junta instrumentada. A Figura 66 representa a relação entre a força e o deslocamento ao longo do ensaio.

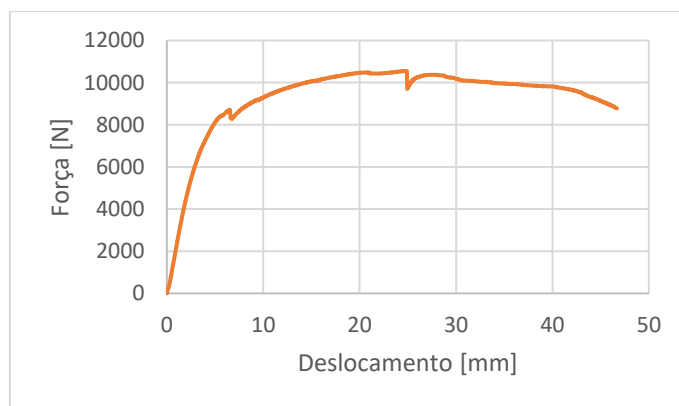


Figura 66-Força vs Deslocamento (Ensaio de flexão com junta instrumentada)

Observando a Figura 66 é perceptível que a junta atingiu a rotura, mais precisamente quando o perfil tubular vertical sofreu um deslocamento de 24,70 mm. A força máxima que foi atingida neste ensaio ronda os 10547 N.

Os dados que foram retirados dos extensómetros geraram gráficos com um ruído reduzido, contudo, saliente-se que este facto ocorreu devido ao erro cometido na realização dos ensaios, já explicado anteriormente.

No extensómetro 1 (Figura 67) obteve-se o valor de 77,70 MPa e no extensómetro 2 (Figura 68) retirou-se o valor de 120 MPa, ambos os valores foram retirados quando se atingiu a força máxima no ensaio. Frisar que os valores têm resultados negativos ou positivos devido à junta num lado estar a sofrer à tração e no outro lado à compressão.

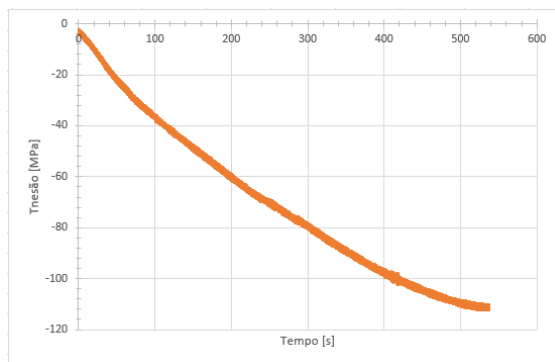


Figura 67-Extensómetro 1 (Tensão vs Tempo)

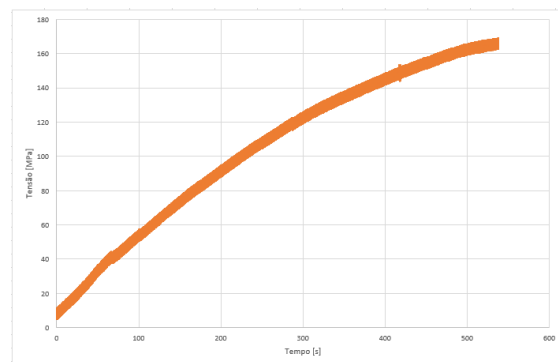


Figura 68-Extensómetro 2 (Tensão vs Tempo)

Visto que o ensaio de flexão decorreu dentro da normalidade, os valores de tensão medidos pelos extensómetros são fidedignos. Deste modo é correto efetuar uma comparação entre valores experimentais e os valores simulados, para saber se existe uma verificação do modelo, ou seja, se as tensões estiverem com valores aproximados é possível concluir que as simulações realizadas no *software Ansys* são validadas perante um caso real.

Deste modo, foram retirados valores dos dois extensómetros, para o intervalo de 25 a 30 segundos, onde as tensões acabam por não variar muito, optando pelos valores de tensão no instante de 27 segundos.

Para o extensómetro 1 (Figura 67) retirou-se o valor de 11,40 MPa e no extensómetro 2 (Figura 68) obteve-se o valor de 21,40 MPa.

Para conseguir obtermos um termo de comparação, no programa de simulação recriaram-se os extensómetros com os tamanhos reais e retiramos as tensões instaladas, sendo possível comprovar na Figura 69 e Figura 70.

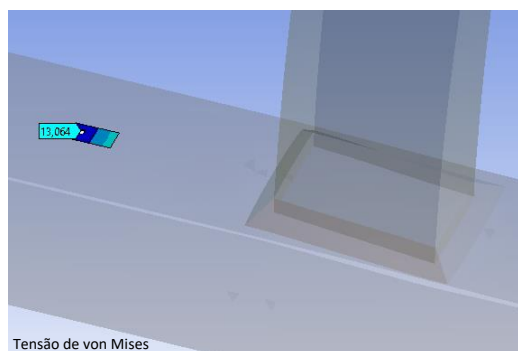


Figura 69-Extensômetro 1 (Simulado no *software Ansys*)
[MPa]

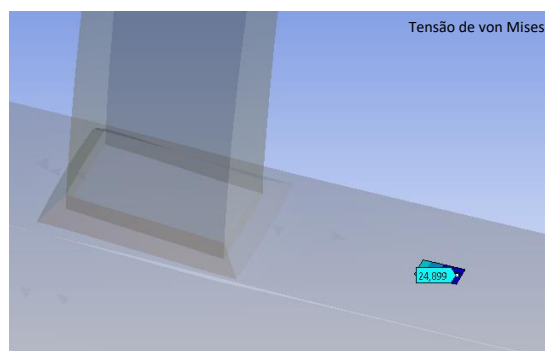


Figura 70-Extensômetro 2 (Simulado no *software Ansys*)
[MPa]

Recorrendo à Figura 69 é possível conhecer-se o valor da tensão instalada num ponto do extensômetro 1, sendo este 13,064 MPa. O mesmo é exequível para o extensômetro 2, isto é, observando a Figura 70 sabe-se que o valor da tensão instalada num ponto do extensômetro 2 é 24,899 MPa.

Obtendo-se todos os valores necessários das tensões instaladas procede-se ao cálculo da diferença existente entre os métodos que podemos observar na Tabela 32.

Tabela 32-Diferença entre tensão do ensaio experimental e tensão do ensaio numérico

Extensômetro	Ensaio Experimental [MPa]	Ensaio Numérico [MPa]	Erro [%]
1	11,40	13,064	7,78
2	21,40	24,899	16,35

Deste modo, conclui-se que a percentagem de erro não é muito elevada, para o caso em específico, onde vários elementos têm influência nestes resultados. São exemplo desta realidade o facto de os extensómetros poderem não estar na medida totalmente exata ou algum erro no procedimento de ensaio. Pode, igualmente, no modelo simulado, uma alteração da malha influenciar os resultados, ou seja, um erro de 7,78% e um erro de 16,35% não são elevados, assim sendo o método simulado está validado perante o método prático realizado.

Por fim, é importante abordar a rotura que ocorreu na junta depois do ensaio de flexão ser executado. A Figura 71 e Figura 72 exibem o estado final da junta tubular.



Figura 71- Junta após ensaio (Ensaio de flexão com junta instrumentada)



Figura 72- Fissura obtida durante o ensaio (Ensaio de flexão com junta instrumentada)

Considerando os resultados obtidos constata-se que existiu uma rotura por punçoamento, apesar de a mesma não separar ambos os perfis, com mais um pouco de deslocamento a rotura ia ser mais perceptível e a separação dos perfis iria-se realizar.

Em síntese, para a mesma geometria de junta, nas mesmas condições de ensaio, com as mesmas propriedades de soldadura obteve-se roturas diferentes. Um ponto que determina esta diferença é o processo de soldadura que pode ter origem no próprio soldador até, mesmo, às diversas variáveis da soldadura e seus efeitos como já foi mencionado anteriormente.

Os resultados obtidos foram dentro do esperado e, saliente-se, que o erro obtido entre as tensões práticas e tensões simuladas foram aceitáveis de modo a validar o modelo simulado, assim sendo, o uso de modelos simulados será uma forte ferramenta para conseguir alcançar melhorias construtivas.

3.3 Análise e discussão de parâmetros que influenciam a ligação

Mediante os pontos referidos anteriormente é relevante analisar outros modelos e compreender o que os diferencia de modo a poder realizar uma melhoria construtiva.

Nos modelos em análise irão constar modelos que são validados pelo EC3-1-8 [41] e modelos que não são validados pelo mesmos, devido a não atingirem uma espessura nominal mínima, de acordo com a norma EC3-1-8 [41].

Primordialmente foi averiguado a importância que o ângulo de soldadura pode conceder para uma ligação tubular. Para a simulação foi usado como elemento 0 o perfil tubular com uma secção 40x40x3 [mm] e o perfil tubular com uma secção 40x25x3 [mm] para o elemento 1.

A Figura 73 apresenta o ponto usado para retirar os valores das tensões obtidas nos estudos realizados que serão mostrados posteriormente, através da simulação numérica.

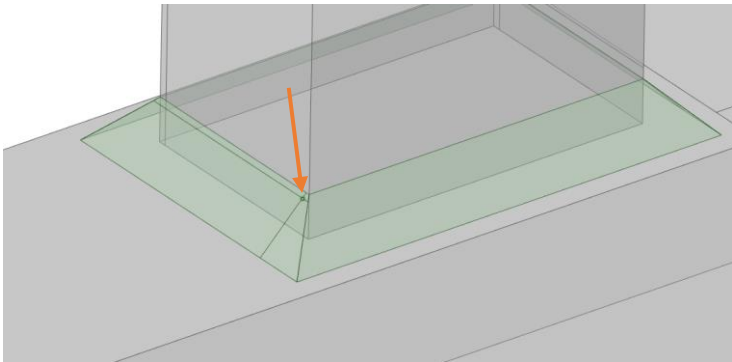
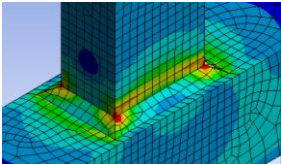
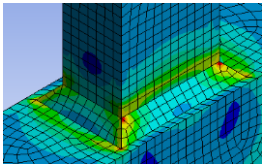
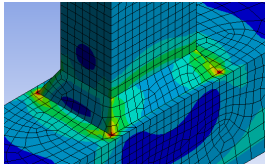


Figura 73-Ponto usado para retirar os valores das tensões da simulação numérica

A Tabela 33 apresenta a diferença que o ângulo de soldadura pode fazer numa ligação e a Figura 74 exibe os valores obtidos no mesmo ponto (Figura 73) com os ângulos de soldadura a serem alterados mediante a simulação, salientando que os resultados conseguidos são de modelos simulados a sofrer os mesmos esforços de tração.

Tabela 33-Diferença do ângulo de soldadura numa ligação suportando esforço de tração

Ângulo	30°	45°	60°
Simulação Numérica (Tração)			

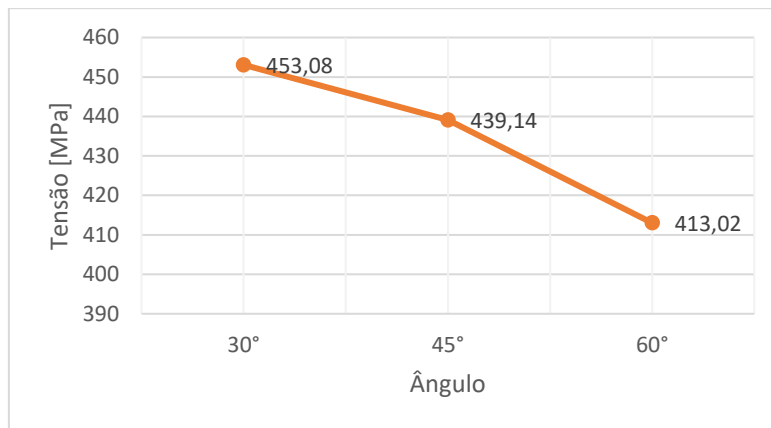
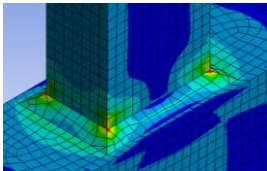
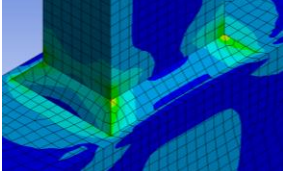
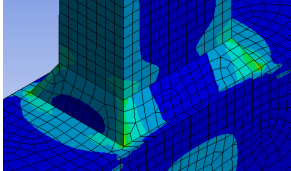


Figura 74-Variação da tensão de von Mises num ponto da ligação suportando um esforço de tração

A Tabela 34 e a Figura 75 mostram a diferença que o ângulo de soldadura cria na união soldada, sendo agora efetuado para modelos simulados a sofrerem os mesmos esforços de flexão.

Tabela 34-Diferença do ângulo de soldadura numa ligação suportando esforço de flexão

Ângulo	30°	45°	60°
Simulação Numérica (Flexão)			

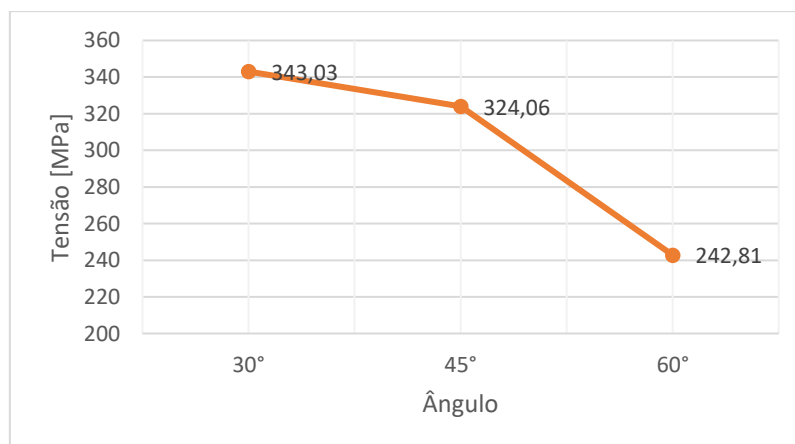


Figura 75-Variação da tensão de von Mises num ponto da ligação suportando um esforço de flexão

Após observar tanto a Figura 74, como a Figura 75 é evidente uma diminuição da tensão instalada na ligação soldada com o aumento do ângulo de soldadura.

Quando a junta sofre esforço de tração, o aumento do ângulo de soldadura não revela grande alteração na tensão instalada, rondando uma diminuição de 3% (1,03x menor) dos 30° para 45° e uma diminuição de 6% (1,06x menor) dos 45° para 60°.

Para o caso da junta sofrer esforços de flexão a alteração do ângulo altera significativamente a tensão instalada, conseguindo uma diminuição de 5,5% (1,05x menor), dos 30° para 45° e uma diminuição acentuada de 25,1% (1,33x menor), dos 45° para 60°, alcançando uma tensão instalada bastante inferior à tensão de cedência do material.

Após o estudo da influência do ângulo no cordão de soldadura foi explorado a diferença entre o uso de dois cordões de soldadura ou quatro cordões de soldadura para a ligação soldada em estudo. Para esta investigação, todos os cordões de soldadura contêm as mesmas características, isto é, uma espessura efetiva de 5 mm e um ângulo de 45°, no cordão de soldadura. A Figura 76 e Figura 77 apresentam uma junta com dois cordões de soldadura e quatro cordões de soldadura, respetivamente, com o intuito de exemplificar a diferença de quantidades e disposição de cordões que ocorrerá neste estudo.

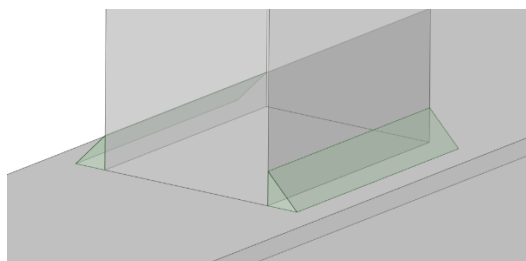


Figura 76-Junta com 2 cordões de soldadura

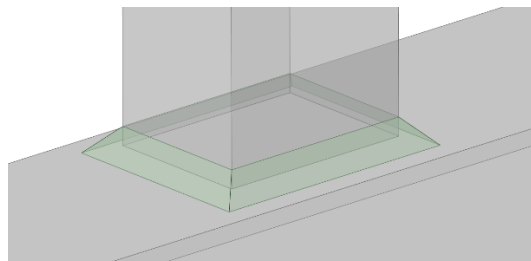


Figura 77-Junta com 4 cordões de soldadura

Foram simuladas diversas juntas com espessuras nominais diferentes e com secções desiguais de modo a compreender a importância da quantidade de cordões a utilizar na ligação soldada. Foram, igualmente, simulados quatro modelos de juntas em T sofrendo os mesmos esforços de tração e outros quatro modelos sofrendo os mesmos esforços de flexão, estando os resultados de tensão máxima obtidos presentes na Tabela 35 e Tabela 36.

Tabela 35-Comparação da tensão instalada no uso de 2 cordões ou 4 cordões na união soldada sofrendo esforços de tração [Tensão de von Mises]

Elemento	Perfil	2 Cordões Tensão Máx. [MPa]	4 Cordões Tensão Máx. [MPa]	Diferença [%]
1	30x30x2	906,85	359,01	60,41
0	30x30x2			
1	40x30x2	1039,30	568,03	45,34
0	50x30x3			
1	40x30x3	635,85	470,70	25,97
0	50x30x3			
1	40x40x2	950,59	282,11	70,32
0	40x40x2			

Na Tabela 35 é notório que a utilização de quatro cordões de soldadura otimiza a união soldada de uma forma crucial. Contudo, é interessante evidenciar que juntas tubulares, com perfis de espessura nominal menor, a utilização de mais cordões de soldadura aumenta significativamente a resistência.

Para complementar esta análise, a Tabela 36 exibe a comparação do uso de dois cordões ou quatro cordões de soldadura no modelo simulado sofrendo esforços de flexão.

Tabela 36-Comparação da tensão instalada no uso de 2 cordões ou 4 cordões na união soldada sofrendo esforços de flexão [Tensão de von Mises]

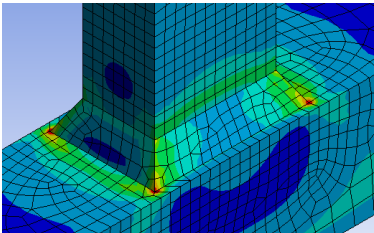
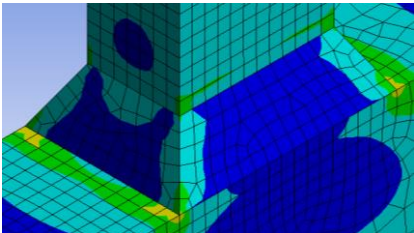
Elemento	Perfil	2 Cordões Tensão Máx. [MPa]	4 Cordões Tensão Máx. [MPa]	Diferença [%]
1	30x30x2	598,35	186,82	68,78
0	30x30x2			
1	40x30x2	817,21	381,91	53,27
0	50x30x3			
1	40x30x3	566,14	298,91	47,20
0	50x30x3			
1	40x40x2	429,28	151,81	64,64
0	40x40x2			

Mais uma vez é explícito que a utilização de quatro cordões de soldadura melhora a ligação soldada, conseguindo diferenças significativas, sendo a mais baixa aproximadamente de 47%. Salienta-se, no entanto, que o aumento da quantidade de cordões de soldadura não é suficiente para obter uma junta tubular com resistência adequada, porque a tensão obtida num ponto da ligação (Figura 73) está sempre superior à tensão de cedência do material, como se pode constatar na Tabela 35 e Tabela 36.

Vamos agora analisar a espessura efetiva do cordão de soldadura. A espessura efetiva do cordão de soldadura é significativa para uma união soldada e deve ser analisada de modo a retirar o maior benefício. Foram simuladas duas uniões soldadas com as mesmas características de perfis tubulares e com os mesmos comprimentos de cordão com uma variação da espessura, salientando que o cordão em análise tem um ângulo de 60°.

A Tabela 37 apresenta os valores de tensão no mesmo ponto para diferentes espessuras do cordão, sendo aplicado um esforço de tração ao modelo simulado (mesmo esforço para ambas as simulações).

Tabela 37-Valores da tensão com alteração da espessura efetiva do ângulo de soldadura sofrendo esforço de tração [Tensão de von Mises]

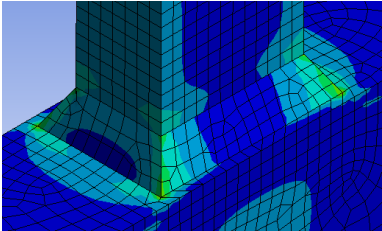
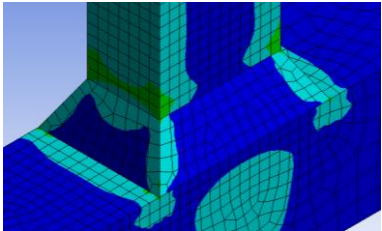
a	10 mm	15 mm
Simulação Numérica (Tração)		
Valor Tensão Máxima	413,02 MPa	190,50 MPa

Com um aumento de 50% do valor da espessura efetiva do cordão de soldadura constata-se que houve uma diminuição da tensão instalada de 46%, aproximadamente, com a junta a ser tracionada.

Para complementar o estudo, foram efetuadas simulações com alteração dos esforços aplicados, acabando por retirar o esforço axial aplicado no extremo do perfil e submeter o mesmo a esforços de flexão.

A Tabela 38 apresenta os valores de tensão no mesmo ponto para diferentes espessuras do cordão sendo aplicado um esforço de flexão ao modelo simulado (mesmo esforço para ambas as simulações).

Tabela 38-Valores da tensão com alteração da espessura efetiva do ângulo de soldadura sofrendo esforço de flexão
[Tensão de von Mises]

a	10 mm	15 mm
Simulação Numérica (Flexão)		
Valor Tensão Máxima	242,81 MPa	130,68 MPa

Novamente, com um aumento de 50% do valor da espessura efetiva do cordão de soldadura, deteta-se que ocorre uma diminuição da tensão instalada em torno de 54%, comprovando-se que, independentemente dos esforços aplicados, a espessura efetiva do cordão não se altera de forma significativa, salientando-se que a percentagem de espessura do cordão acaba por equivaler à diminuição da tensão instalada na união soldada.

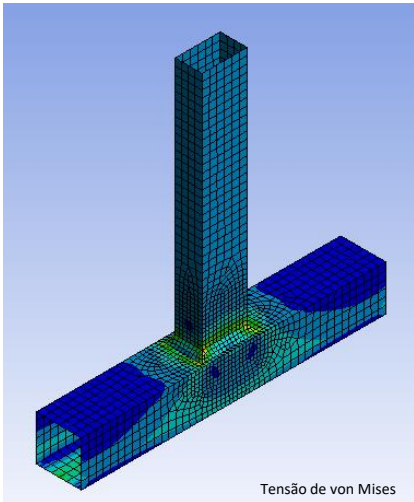
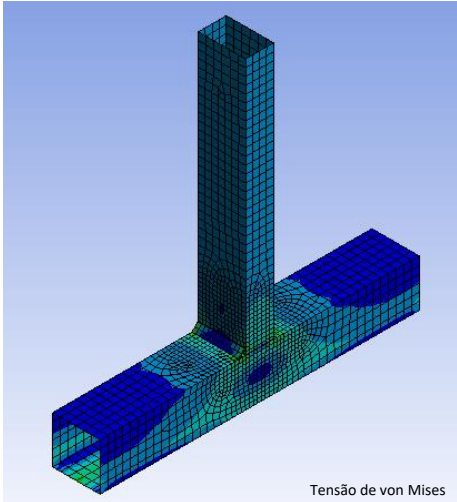
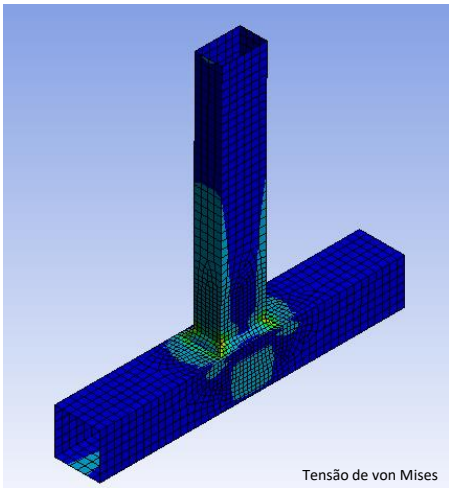
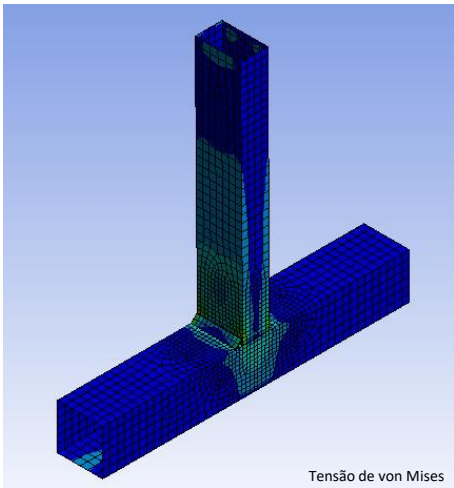
Frisar que o excesso de soldadura pode ocorrer e comprometer o desempenho da soldadura efetuada ou da junta soldada, concebendo alterações nas propriedades metalúrgicas e mecânicas derivando numa rotura frágil ou dúctil, deste modo é fundamental dimensionar o cordão de soldadura.

Além da definição do cordão e das suas características é relevante perceber se as posições dos perfis da junta concebem alguma resistência ou se o posicionamento dos mesmos não influencia a ligação tubular de forma nenhuma.

No sentido de constatar alguns resultados, foram efetuadas quatro simulações, duas com o modelo a sofrer os mesmos esforços de tração e, outras duas, com o modelo a sofrer os mesmos esforços de flexão.

A Tabela 39 expõe as simulações realizadas, notabilizando que é empregue como elemento 0 um perfil tubular com uma secção 40x40x3 [mm] e, para o elemento 1, é utilizado um perfil tubular com uma secção 40x25x3 [mm].

Tabela 39-Comparação do uso de perfis com larguras iguais e diferentes

Modelo Simulado	Perfis sem larguras iguais	Perfis com larguras iguais
Simulação Numérica (Tração)	 Tensão de von Mises	 Tensão de von Mises
Valor Tensão Máxima	439,14 MPa	229,61 MPa
Simulação Numérica (Flexão)	 Tensão de von Mises	 Tensão de von Mises
Valor Tensão Máxima	324,06 MPa	185,65 MPa

Recorrendo à Tabela 39 pode-se detetar que existe uma alteração na configuração da junta tubular, nomeadamente a rotação de 90° do elemento 1.

Realce-se, contudo, que antes das ilações que possamos retirar sobre os resultados obtidos, é necessário frisar que os cordões usados na ligação soldada têm a mesma espessura e os mesmos comprimentos. A única diferença reside no facto, de anteriormente, existir quatro soldaduras de canto e, posteriormente, passarmos a conter duas soldaduras de canto e duas soldadura topo a topo, para o caso de o modelo simulado conter perfis de larguras iguais.

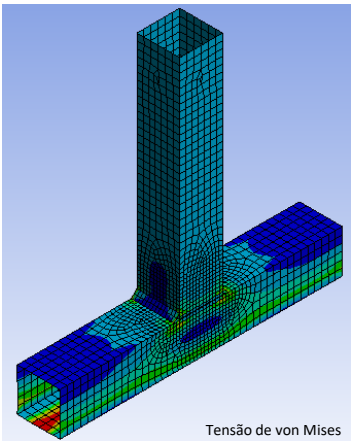
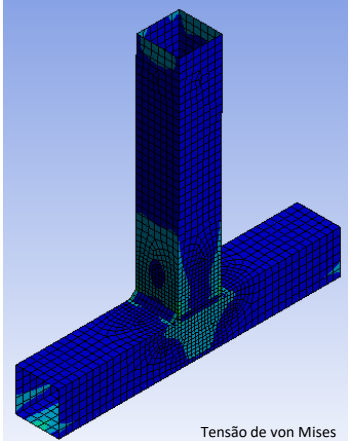
Desta forma, com o modelo simulado a sofrer esforços de tração ou de flexão, existe uma diminuição da tensão instalada num ponto da ligação soldada.

Para o modelo a sofrer esforço de tração houve uma diminuição da tensão instalada em torno de 48%, já para o modelo a sofrer esforço de flexão verificou-se uma diminuição da tensão instalada aproximadamente de 43%. Com isto, afirma-se que a utilização de uma junta tubular com ligação entre tubos de igual largura consegue obter uma resistência, em média, cerca de 1,8x maior do que uma ligação entre tubos de larguras substancialmente diferentes.

Para conseguir perceber a vantagem da utilização de perfis com larguras iguais foi simulado um modelo com dois perfis tubulares com uma secção de 40x40x2 [mm] aplicando as mesmas forças dos modelos simulados anteriormente.

A Tabela 40 apresenta o modelo simulado alterando o esforço aplicado no mesmo e o valor da tensão máxima instalada na ligação soldada efetuada.

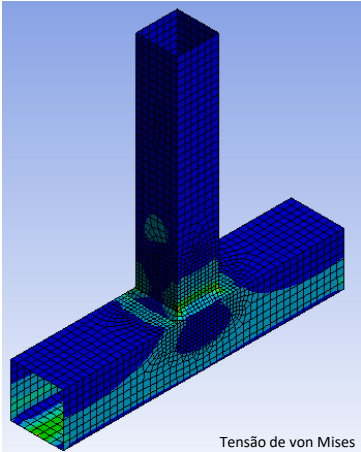
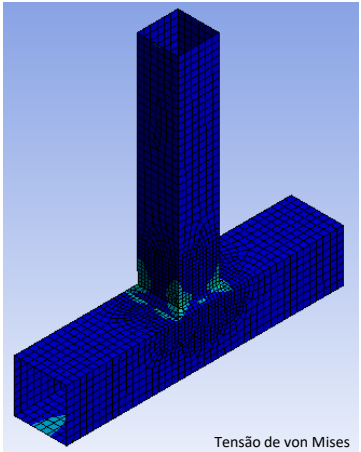
Tabela 40-Junta tubular com 2 perfis de secção 40x40x2 [mm] sofrendo diferentes esforços

Tração	Flexão
	
282,11 MPa	151,81 MPa

Foi simulado um modelo, mais uma vez, com alteração dos esforços aplicados, contudo com diferentes secções nos perfis seleccionados e com espessuras superiores ao simulado anteriormente.

A Tabela 41 apresenta a junta simulada com um perfil de secção 50x50x3 [mm] como elemento 0 e um perfil de secção 40x40x3 [mm] como elemento 1 e, ainda, expõe a tensão máxima instalada na união soldada.

Tabela 41-Junta tubular com perfil 40x40x3 [mm] e com perfil 50x50x3 [mm] sofrendo diferentes esforços

Tração	Flexão
	
260,15 MPa	178,44 MPa

Desta forma, reforça-se que o uso de perfis com larguras iguais consegue marcar a diferença e torna a junta bastante mais resistente. Com as simulações observa-se que, com uma junta com menor espessura e menores perfis de secção, atinge-se basicamente resultados idênticos.

Refira-se, contudo, que a simulação onde o modelo está a ser tracionado, o valor é relativamente maior no modelo onde os perfis têm menores espessuras. Porém, são mais relevantes os valores obtidos no ensaio de flexão simulado, visto que uma superestrutura suporta bastantes esforços de flexão. Neste caso o modelo com menor espessura e menores perfis de secção acaba por alcançar um ganho de 14,92% comparativamente ao outro modelo simulado.

É importante, igualmente, evidenciar que atingindo uma resistência mais favorável em juntas tubulares com menores espessuras e menores perfis de secção, obtemos juntas

mais leves, consequentemente, fabricamos superestruturas com peso menor e com uma resistência maior.

3.4 Propostas de melhoria construtiva

Durante a realização da dissertação, foram feitas várias simulações, das quais obtiveram-se inúmeros resultados dando origem a propostas de solução, de tal forma que foram evidenciadas duas configurações para efetuar uma melhoria construtiva da junta em estudo. Os subcapítulos 3.4.1 e 3.4.2 revelam as propostas de melhoria a implementar.

3.4.1 Junta tubular em estudo com resultados adquiridos implementados

Numa primeira abordagem a esta proposta, é pertinente referir as melhorias que irão ser efetuadas na junta em estudo. Durante as simulações realizadas foram abordados diversos pontos que influenciam a junta tubular, nomeadamente o ângulo do cordão de soldadura.

Para esta proposta vai ser usado um ângulo de soldadura cujo valor é 60° , visto que alcançou maiores ganhos. Com o objetivo de obter uma junta com maior resistência, esta apresentará quatro cordões de soldadura e uma espessura efetiva de cordão de soldadura de 7,5 mm.

Por fim, será utilizada uma geometria de junta em que os perfis tubulares têm larguras iguais, uma vez que, durante a investigação, obtiveram-se excelentes resultados neste contexto.

Assim sendo, optou-se por efetuar o cálculo dos valores teóricos recorrendo ao EC3-1-8 [41]. A Tabela 42 exhibe a alteração realizada na junta tubular.

Tabela 42-Dimensões da junta tubular melhorada

	$t_0 = 3 \text{ mm}$
	$t_1 = 3 \text{ mm}$
	$h_0 = 40 \text{ mm}$
	$h_1 = 25 \text{ mm}$
	$b_0 = 40 \text{ mm}$
	$b_1 = 40 \text{ mm}$

Onde:

b_0 – Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento RHS 0;

b_1 - Largura total na direção perpendicular ao plano do elemento RHS 1;

h_0 – Altura total no plano da secção transversal do elemento 0;

h_1 - Altura total no plano da secção transversal do elemento 1;

t_0 - Espessura da parede do elemento 0;

t_1 - Espessura da parede do elemento 1;

N_1 – Valor do esforço normal atuante no elemento 1.

Como os perfis tubulares são exatamente iguais alterando só o posicionamento dos mesmos, estes cumprem os requisitos que o EC3-1-8 [41] exige, isto é, requisito angular da junta, espessura nominal mínimo dos perfis e a classe.

Consequentemente é fulcral calcular os valores para a validação da junta devido à alteração do posicionamento dos perfis, assim sendo, a Tabela 43 apresenta os valores calculados para verificar se estes estão dentro do domínio pretendido.

Tabela 43-Valores para a validação da junta melhorada

Junta T	b_1/b_0	b_1/t_1	h_1/t_1	h_0/b_0	h_1/b_1	b_0/t_0	h_0/t_0
	($\geq 0,25$)	(≤ 35)	(≤ 35)	($\geq 0,2$ mas $\leq 2,0$)	($\geq 0,2$ mas $\leq 2,0$)	(≤ 35)	(≤ 35)
	1,00	13,33	8,33	1,00	0,625	13,33	13,33

Recorrendo à Tabela 43, conclui-se que a junta tubular melhorada cumpre todas as restrições impostas pelo EC3-1-8 [41].

Com as restrições validadas, introduz-se os parâmetros necessários para a junta tubular melhorada, estando presentes na Tabela 44.

Tabela 44-Parâmetros necessários para a junta tubular melhorada

Parâmetros	
k_n	1
β	1
f_b	355 MPa
b_{eff}	30 mm
$b_{e.p}$	30 mm
γ_{M5}	1

Desta forma, a Tabela 45 apresenta os valores teóricos dos esforços normais e de flexão dentro e fora do plano, segundo o EC3-1-8 [41].

Tabela 45-Valores calculados dos esforços da junta tubular melhorada

Esforços normais	
Rotura da face da corda	—
Encurvadura da parede lateral da corda	$N_{1,Rd} = 85000 \text{ N}$
Rotura do elemento	$N_{1,Rd} = 101175 \text{ N}$
Punçoamento	$N_{1,Rd} = 67636,6 \text{ N}$
Esforços de flexão no plano	
Rotura por face da corda	—
Esmagamento da parede lateral da corda	$M_{ip,1,Rd} = 852000 \text{ N.mm}$
Rotura do elemento	$M_{ip,1,Rd} = 592850 \text{ N.mm}$
Esforços de flexão fora do plano	
Rotura da face da corda	—
Esmagamento da parede lateral da corda	$M_{op,1,Rd} = 1576200 \text{ N.mm}$
Distorção da corda	$M_{op,1,Rd} = 1479660 \text{ N.mm}$
Rotura do elemento	$M_{op,1,Rd} = 773900 \text{ N.mm}$

Cumprindo os valores apresentados na Tabela 45, a junta com as melhorias introduzidas fica validada pelo EC3-1-8 [41].

Para garantir a validação total da junta, isto é, incluindo o cordão de soldadura, é necessário efetuar os cálculos do cordão, contudo como só existiu alteração da espessura efetiva do cordão de ângulo, os cálculos são idênticos aos apresentados no subcapítulo 3.2.2, com mudança da espessura de 5 mm para 7,5 mm.

Refazendo todo procedimento obtém-se os resultados apresentados na Tabela 46.

Tabela 46-Esforços da junta melhorada por unidade de comprimento

L_{eff}	$F_{w,Rd}$
25 mm	49074,8 N
40 mm	78519,6 N

Com um esforço aplicado inferior ao exibido na Tabela 46 a junta melhorada está totalmente validada pelo EC3-1-8 [41].

Assim sendo, com objetivo de observar as alterações que as melhorias causaram na junta tubular realizaram-se simulações numéricas, aplicando as mesmas condições que foram aplicadas na junta tubular, sem melhorias construtivas.

A Figura 78 e Figura 79 apresentam os resultados das simulações efetuadas com a junta melhorada a suportar esforços de tração.

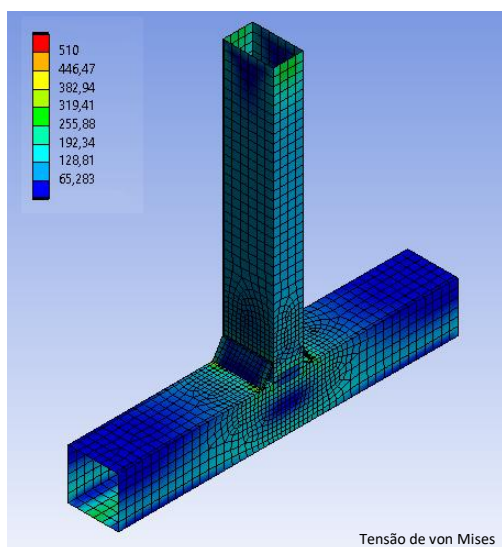


Figura 78-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com melhoria (Escala Real 1.0x) [MPa]

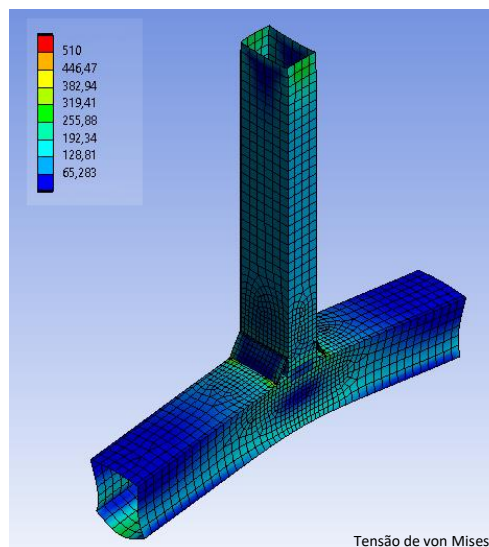


Figura 79-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com melhoria (Escala Automática 58.0x) [MPa]

A Figura 80 e Figura 81 exibem os resultados das simulações efetuadas com a junta melhorada a suportar esforços de flexão.

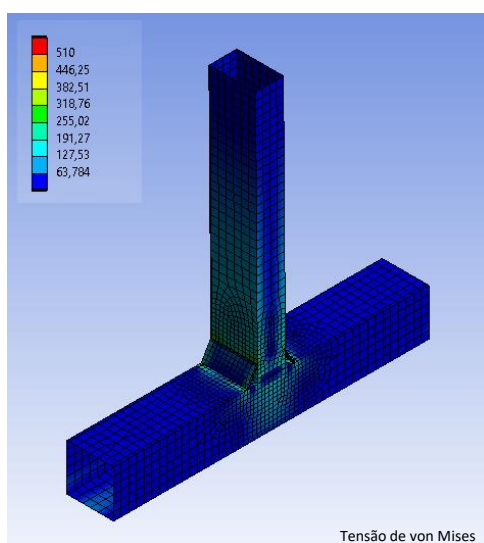


Figura 80-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com melhoria (Escala Real 1.0x) [MPa]

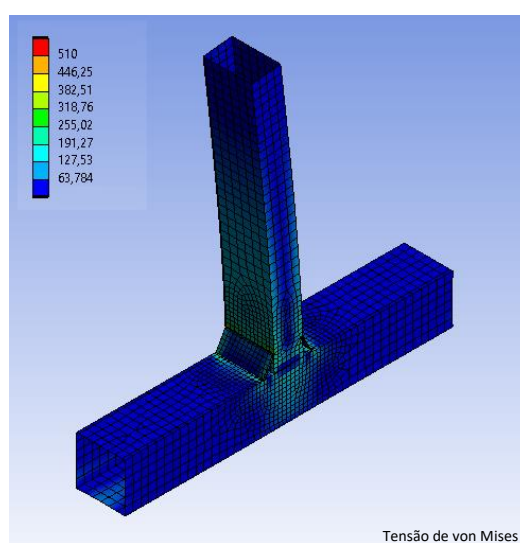


Figura 81-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com melhoria (Escala Automática 13.0x) [MPa]

Numa avaliação visual, observando as simulações realizadas, chega-se à conclusão de que a distribuição de tensões é mais uniforme, contudo o subcapítulo 3.4.3 apresenta os diversos dados retirados das simulações e as conclusões que derivam após análise dos dados.

3.4.2 Junta tubular em estudo com reforço

Com o intuito de alcançar uma junta mais resistente, nesta melhoria construtiva irá ser abordado a colocação de reforços na junta tubular.

A junta tubular sem reforços tem as mesmas características da junta anteriormente concebida, isto é, perfis tubulares e posicionamento de perfis iguais. Deste modo é notório que a junta é válida segundo o EC3-1-8 [41].

Perante a análise do EC3-1-8 [41] encontra-se requisitos para reforços nas juntas em T, contudo só existe referência para juntas reforçadas com chapas de banzo ou com chapas laterais, ficando o tipo de reforço que tencionamos aplicar sem requisito algum mencionado.

Desta forma, o reforço tem a mesma largura e altura que o comprimento lateral do perfil tubular da junta, isto é, 40 mm. Salientar que os cordões de soldadura usados neste modelo têm uma espessura efetiva do cordão de ângulo de 5 mm.

A Figura 82 e Figura 83 apresentam o reforço que irá ser aplicado.

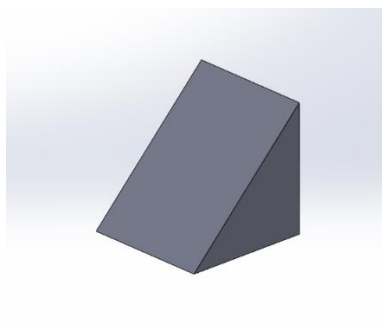


Figura 82-Reforço para junta modelado em CAD
(Vista 1)

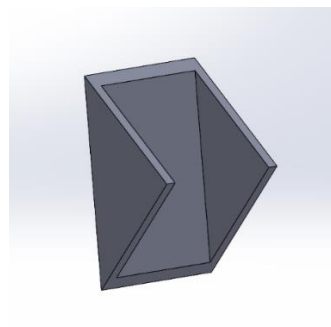


Figura 83-Reforço para junta modelado em CAD
(Vista 2)

O reforço consta com uma espessura de 3 mm e não é integralmente maciço como se pode observar na Figura 83. Sem mais nenhuma restrição por parte da norma, considera-se válida a junta tubular reforçada.

Assim sendo, com a finalidade de verificar as alterações que os reforços causaram na junta tubular realizaram-se simulações numéricas, aplicando-se as mesmas condições que foram aplicadas na junta tubular, sem melhorias construtivas e com melhorias construtivas. A Figura 84 e Figura 85 exibem os resultados das simulações efetuadas da junta com reforço a suportar esforços de tração.

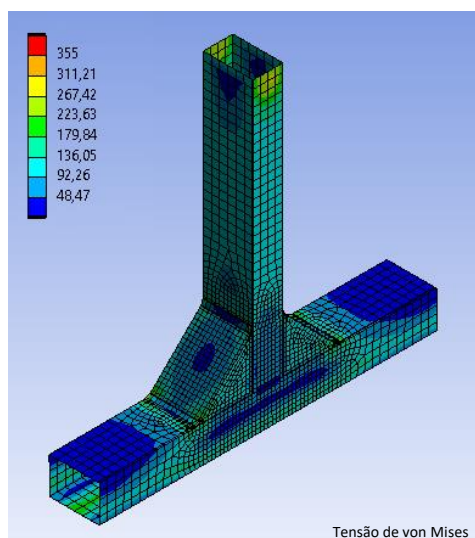


Figura 84-Malha de elementos finitos com aplicação de
força axial no modelo com reforço
(Escala Real 1.0x) [MPa]

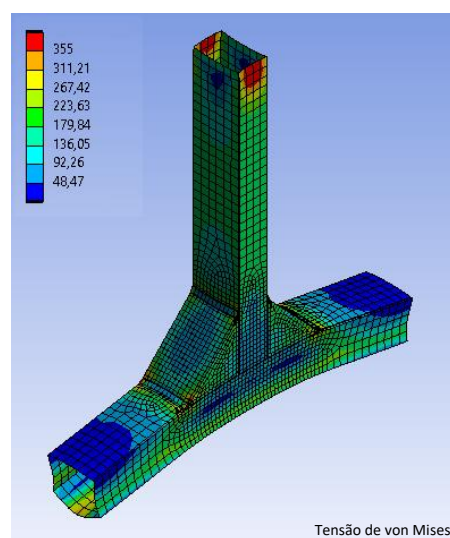


Figura 85-Malha de elementos finitos com aplicação de
força axial no modelo com reforço
(Escala Automática 69.0x) [MPa]

Com uma vista mais pormenorizada do reforço aplicado, a Figura 86 mostra a distribuição de tensões existente no reforço aplicado e uma noção do valor das tensões existentes no reforço com a junta a ser tracionada.

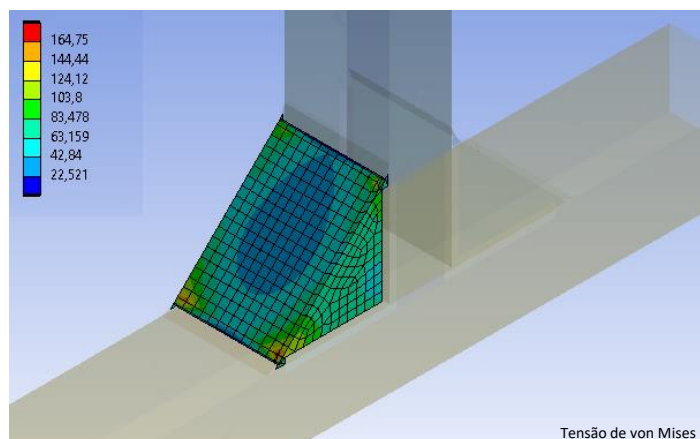


Figura 86-Malha de elementos finitos com aplicação de força axial no modelo com reforço (tensão no reforço) (Escala Real 1.0x) [MPa]

A Figura 87 e Figura 88 apresentam os resultados das simulações efetuadas da junta com reforço a suportar esforços de flexão.

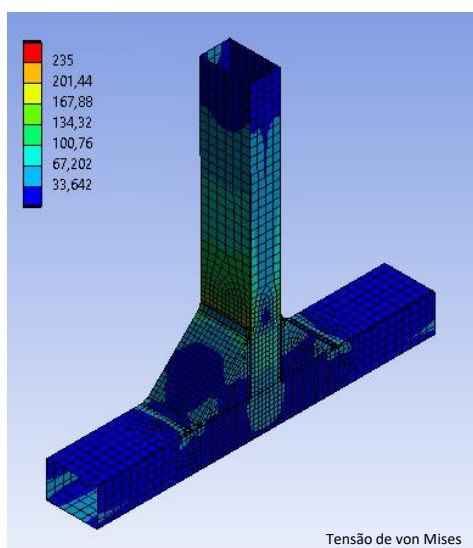


Figura 87-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (Escala Real 1.0x) [MPa]

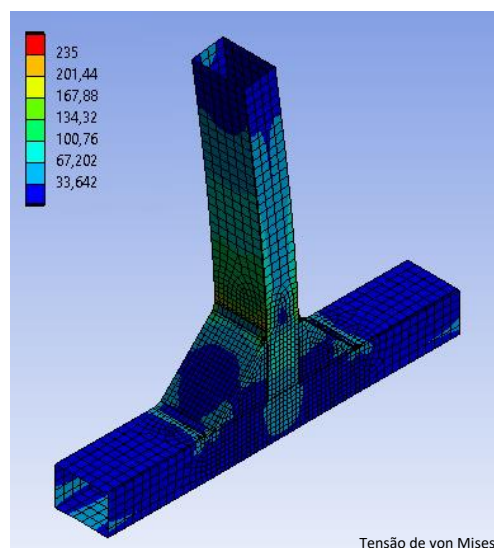


Figura 88-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (Escala Automática 22.0x) [MPa]

Com uma visão mais detalhada do reforço aplicado, a Figura 89 mostra a distribuição de tensões presentes no reforço com a junta a sofrer esforço de flexão.

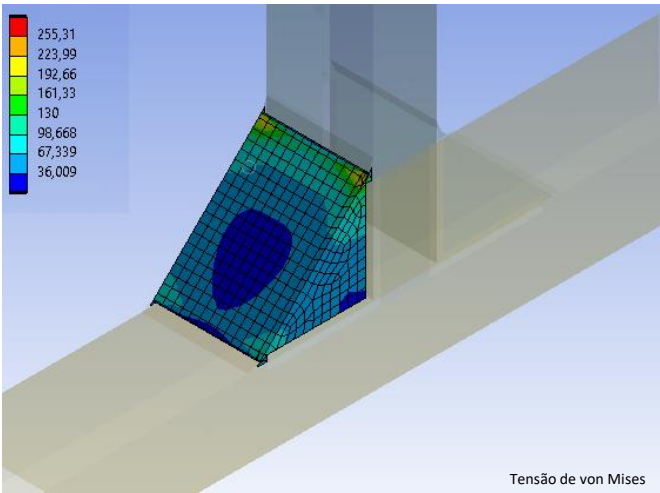


Figura 89-Malha de elementos finitos com aplicação de momento fletor no modelo com reforço (tensão no reforço) (Escala Real 1.0x) [MPa]

Mais uma vez, com base nas simulações realizadas, conclui-se que a distribuição de tensões está mais uniforme, mas o subcapítulo 3.4.3 apresenta os diversos dados obtidos das simulações e as conclusões extraídas da análise dos dados.

3.4.3 Apresentação de resultados das melhorias construtivas

Com a finalidade de recapitular os parâmetros modificados, a Tabela 47 apresenta a diferença entre a junta sem melhorias construtivas e a junta com melhorias construtivas.

Tabela 47-Diferenças entre junta sem melhorias e junta com melhorias

	Junta sem melhorias	Junta com melhorias
Ângulo de soldadura	45°	60°
Nº de cordões usados	4	4
Espessura efetiva do cordão	5 mm	7,5 mm
Perfis com largura	Diferente	Igual

Ao longo das simulações executadas foram retirados dados para perceber o impacto das alterações efetuadas. Neste contexto, vamos apresentar os pontos de onde foram retirados os valores durante a simulação e, posteriormente, apresentar esses mesmos valores e ganhos comparativamente ao modelo inicial, sem melhorias construtivas.

A Figura 90 representa os pontos analisados tanto na junta sem melhoria, como na junta com melhoria.

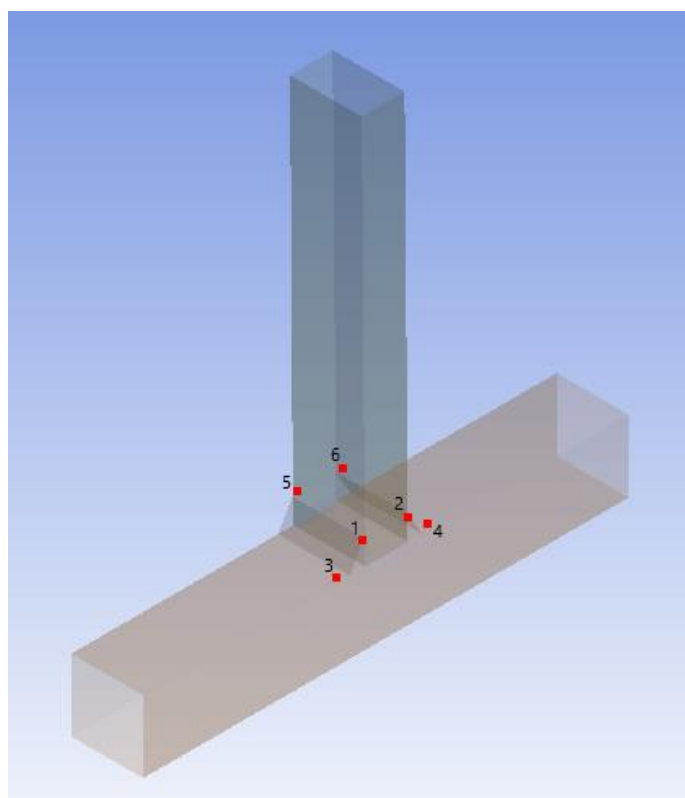


Figura 90-Indicação dos pontos em análise para junta com melhoria

Posto isto, a Tabela 48 apresenta os resultados obtidos para a junta com melhoria, suportando esforço de tração e os ganhos que se obteve comparando com a junta inicial, sem nenhuma alteração. A Tabela 49 é apresentada com o mesmo intuito da Tabela 48, alterando o modo de esforço de tração para um esforço de flexão.

Tabela 48-Resultados obtidos para a junta com melhoria suportando esforço de tração

Modelo		Tensões obtidas [MPa]	Relação com tensão de cedência [%]	Ganho $\frac{\sigma_{normal}}{\sigma_{melhorada}}$
	Tensão de cedência	355		
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 1)	282,62	79,61	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 2)	282,62	79,61	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 3)	343,04	96,63	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 4)	343,04	96,63	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 5)	445,80	125,58	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 6)	445,80	125,58	-
Com melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 1)	113,48	31,97	2,49
Com melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 2)	113,48	31,97	2,49
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 3)	294,97	83,09	1,16
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 4)	294,97	83,09	1,16
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 5)	194,31	54,74	2,29
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 6)	194,31	54,74	2,29

Tabela 49-Resultados obtidos para a junta com melhoria suportando esforço de flexão

Modelo		Tensões obtidas [MPa]	Relação com tensão de cedência [%]	Ganho $\frac{\sigma_{normal}}{\sigma_{melhorada}}$
	Tensão de cedência	355		
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 1)	180,70	50,90	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 2)	185,22	52,17	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 3)	197,60	55,66	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 4)	192,16	54,13	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 5)	360,11	101,44	-
Sem melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 6)	355,55	100,16	-
Com melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 1)	85,75	24,15	2,11
Com melhoria	Valor da tensão instalada no cordão (Ponto 2)	97,47	27,46	1,90
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 3)	187,50	52,82	1,05
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 4)	110,06	31,00	1,75
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 5)	259,65	73,14	1,39
Com melhoria	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 6)	263,18	74,14	1,35

Tendo sido apresentado os resultados obtidos da junta com melhoria, serão agora expostos os valores alcançados para a junta com reforço.

A Figura 91 identifica os pontos que foram usados para retirar a tensão instalada na junta com reforço.

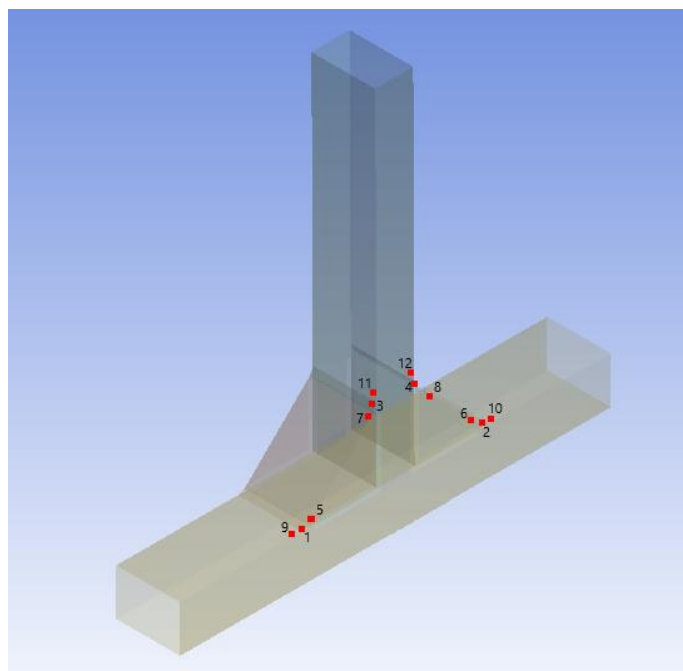


Figura 91-Indicação dos pontos em análise para junta com reforço

Os resultados obtidos e a relação da tensão de cedência relativos à junta com reforço suportando esforço de tração são expostos na Tabela 50.

Tabela 50-Resultados obtidos para a junta com reforço suportando esforço de tração

Modelo		Tensões obtidas [MPa]	Relação com tensão de cedência [%]
Tensão de cedência		355	
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão inferior (Ponto 1)	160,43	45,19

Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão inferior (Ponto 2)	160,43	45,19
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão superior (Ponto 3)	136,80	38,54
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão superior (Ponto 4)	136,80	38,54
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona inferior (Ponto 5)	174,44	49,14
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona inferior (Ponto 6)	174,44	49,14
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona superior (Ponto 7)	136,45	38,44
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona superior (Ponto 8)	136,45	38,44
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 9)	178,02	50,15
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 10)	178,02	50,15
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 11)	161,54	45,50
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 12)	161,54	45,50

A Tabela 51 tem a mesma finalidade que a Tabela 50, alterando o esforço aplicado, ou seja, em vez de a junta estar a suportar esforços de tração, esta passa a suportar esforços de flexão.

Tabela 51-Resultados obtidos para a junta com reforço suportando esforço de flexão

Modelo		Tensões obtidas [MPa]	Relação com tensão de cedência [%]
Tensão de cedência		355	
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão inferior (Ponto 1)	43,44	12,24
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão inferior (Ponto 2)	44,40	12,51
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão superior (Ponto 3)	111,16	31,31
Com reforço	Valor da tensão instalada no cordão superior (Ponto 4)	81,01	22,82
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona inferior (Ponto 5)	48,11	13,55
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona inferior (Ponto 6)	43,69	12,31
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona superior (Ponto 7)	104,20	29,35
Com reforço	Valor da tensão instalada no reforço zona superior (Ponto 8)	77,04	21,70
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 9)	47,00	13,24
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 0 (Ponto 10)	48,97	13,79
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 11)	177,18	49,91
Com reforço	Valor da tensão instalada no elemento 1 (Ponto 12)	168,73	47,53

Em síntese, a ligação em T, sem melhorias construtivas, foi avaliada pelo EC3-1-8 [41] e conclui-se que o valor das tensões excedeu a tensão de cedência do material em uma ampla faixa. Para ultrapassar esta limitação, foram analisados dois métodos para aumentar a resistência da junta, sendo estes os referidos no subcapítulo 3.4.

Verificou-se que, com a aplicação das melhorias, a tensão instalada é reduzida, seja no cordão de soldadura ou no perfil da junta comparativamente à junta sem melhorias construtivas, tendo-se obtido uma tensão instalada cerca de 1,5x menor que a tensão máxima no modelo sem melhorias construtivas.

De facto, as tensões instaladas diminuíram, aproximadamente o dobro em comparação com a junta sem melhorias, quando as mesmas sofriam esforços de tração. Para esforços de flexão existe algumas melhorias, cerca de 50% de maior resistência, comparativamente ao modelo sem nenhuma alteração efetuada.

Através da análise numérica para a ligação entre perfis tubulares de larguras iguais, verificou-se existir uma boa transmissão de esforços entre os perfis da junta tubular. O elemento 0 não foi muito influenciado com as melhorias, já o elemento 1 tem um aumento de resistência de 2,29x quando sofre esforços axiais, para esforços de flexão melhora cerca de 1,05x a 1,75x.

Os cordões de soldadura resistem bem mais, contudo a sua espessura foi aumentada 50% comparativamente ao modelo em estudo.

Semelhante ao caso anterior, a segunda melhoria construtiva foi a colocação de reforços na junta tubular com perfis de largura igual, verificando-se que os valores de tensão instalados diminuem após o uso de reforços, salientando que os valores atingidos são inferiores ao valor da tensão de cedência.

Também se constatou que com a aplicação do reforço ocorreu uma diminuição das tensões a nível geral.

Contudo, saliente-se, que não é possível efetuar uma comparação precisa, devido a aspetos relacionados os cordões de soldadura e com os pontos de onde são retirados os valores da tensão instalada, pelo facto de não estarem situados nos mesmos locais.

Refira-se, contudo, que a distribuição de tensões é mais uniforme, conseguindo obter-se uma tensão instalada cerca de 2,15x menor que a tensão máxima no modelo, sem melhorias construtivas.

Apesar de existir um maior número de cordões de soldadura, sem alteração da espessura efetiva do cordão de ângulo comparativamente ao modelo sem melhorias, obteve-se tensões instaladas muito menores.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Uma vez que o escopo desta dissertação são as ligações tubulares de uma superestrutura de veículo pesado de passageiros parece-nos que o dimensionamento das juntas tubulares deve ser prudente, considerando o tipo de acidentes graves que pode ocorrer nestes veículos.

Neste trabalho foi estudado um tipo de ligação presente em veículos pesados de passageiros. Este tipo de ligação foi sujeito a uma análise exaustiva nos campos teórico, experimental e, ainda, por simulação numérica, com o intuito último de procurar soluções de melhoria construtiva para, deste modo, aumentar a resistência das ligações.

A utilização do *software* ANSYS 2020 R2 revelou-se extremamente eficaz para o cálculo das tensões.

De acordo com a análise e estudo efetuados, a ligação escolhida e analisada à luz do EC3-1-8 e, por análise numérica pelo método de elementos finitos, verificou-se que as expressões de cálculo para as ligações consagradas pelo EC3-1-8 excedem excessivamente a tensão de cedência do material constituinte dos perfis tubulares.

O processo prático realizado constatou que a margem de erro entre valores simulados e valores obtidos dos ensaios são aceitáveis, de modo a permitir a validação do método de estudo realizado. Para além desta validação, a parte experimental originou diferentes modos de rotura para o mesmo ensaio com modelos de juntas iguais, acabando por comprovar que o processo de soldadura estabelece a diferença.

Desse modo foram aplicadas alterações a parâmetros que influenciam o comportamento da junta tubular, por forma a aumentar a resistência da mesma, tendo-se obtido os seguintes ganhos:

- Com a aplicação de um ângulo de soldadura de 60° obteve-se um ganho entre 1,06x e 1,33x (variação existente devido a esforços aplicados serem diferentes)

relativamente à tensão instalada na junta sem melhorias construtivas (com ângulo de 45°);

- O uso de 4 cordões de soldadura otimiza a união soldada entre 25% a 50%, isto para espessuras de 3 mm; para 2 mm os aumentos de resistência são mais elevados, rondando os 70%;
- A alteração da espessura efetiva do cordão para uma espessura maior diminui a tensão instalada na junta e, independentemente do esforço aplicado, se existir um aumento de 50% da espessura efetiva, este valor equivale, aproximadamente, à diminuição da tensão instalada;
- O uso de perfis tubulares com larguras iguais aumentou a resistência da junta cerca de 1,8x comparada a uma junta com perfis tubulares de larguras diferentes.

Após perceber a influência dos parâmetros alterados foram aplicadas as melhorias construtivas a uma junta tubular, tendo-se obtido os seguintes ganhos:

- Com aplicação das melhorias, a tensão instalada na junta reduziu, tanto no cordão, como nos perfis tubulares ocorrendo uma diminuição da tensão instalada de 1,5x comparada a tensão máxima obtida na junta sem melhorias;
- O uso de perfis com larguras iguais constatou uma melhor transmissão de esforços entre os perfis, salientando que o elemento 0 não sofre alterações significativas com a aplicação das melhorias, já o elemento 1 tem um aumento de resistência de 2,29x quando sofre esforços axiais, e para esforços de flexão melhora cerca de 1,05x a 1,75x;
- As juntas em estudo apresentaram níveis de resistência bastante elevados a níveis de esforço axial. O mesmo não pode ser dito para momentos fletores, já que esta se torna mais frágil. Deste modo, o dimensionamento de uma superestrutura com este tipo de ligações deve ser dimensionada para estar sujeita a esforços axiais, evitando momentos fletores;
- Com a colocação de reforços verifica-se uma junta tubular muito mais resistente, atingindo valores de tensão instalada bastante inferiores à tensão de cedência do material, mas aumenta o trabalho de soldadura e o peso da superestrutura;
- Com o uso de reforços obteve-se uma tensão instalada 2,15x menor que a tensão máxima no modelo sem melhorias construtivas, salientando-se que a espessura efetiva dos cordões era igual à do modelo sem melhorias construtivas, ou seja, uma espessura efetiva de 5 mm.

Em suma, ressalta-se a importância de dimensionar uma superestrutura de um veículo pesado de passageiros para melhorar a sua resistência e, em simultâneo, de forma a conseguir com uma ligação otimizada usando aços com uma tensão de cedência inferior e com menor custo para obter uma superestrutura com igual ou melhor

resistência. Saliente-se, no entanto, que contendo ligações suficientemente resistentes, talvez o uso de outras ligações para reforço não sejam necessárias, alcançando, desse modo, uma redução de peso que para veículos movidos a hidrogénio ou mobilidade elétrica é um fator significativo.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

Como proposta de trabalhos futuros, e tendo em atenção os resultados obtidos, propõe-se os seguintes tópicos:

- Estudar a influência de diferentes reforços numa junta tubular;
- Realização de mais ensaios experimentais de juntas tubulares;
- Diminuir o erro obtido entre as tensões obtidas experimentalmente e as obtidas pela simulação;
- Efetuar o mesmo estudo executado nesta dissertação, mas para outro tipo de ligações.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] J. A. B. Bacete, "Subida no número de acidentes rodoviários," *Expresso*, 2022. <https://expresso.pt/sociedade/2022-11-09-Em-2022-regista-se-uma-subida-no-numero-de-acidentes-rodoviarios-atropelamentos-mortes-consumo-de-combustivel-e-carros-nas-auto-estradas-9067f7d9> (accessed Nov. 14, 2022).
- [2] UNECE, "Regulamento 66," *Jornal Oficial da União Europeia*. 2011.
- [3] "'ANSYS Mechanical 2020 R2' Release 2020."
- [4] "Caetanobus S.A." <https://caetanobus.pt/pt/company/our-numbers/> (accessed Oct. 24, 2021).
- [5] K. Oppong, D. Saini, and B. Shafei, "Characterization of impact-induced forces and damage to bridge superstructures due to over-height collision," *Eng. Struct.*, vol. 236, no. February, p. 112014, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112014.
- [6] D. Chen, R. Yan, and X. Lu, "Mechanical properties analysis of the naval ship similar model with an integrated sandwich composite superstructure," *Ocean Eng.*, vol. 232, no. May, p. 109101, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109101.
- [7] "Superestrutura," 2013. <https://conceito.de/superestrutura> (accessed Nov. 27, 2021).
- [8] M. Liu *et al.*, "Experimental studies on thread-fixed one-side bolted endplate connection with internal strengthening structure," *Eng. Struct.*, vol. 246, no. April, p. 112977, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112977.
- [9] T. Wojdat, P. Kustroń, K. Jaśkiewicz, and J. Pabian, "Study of corrosion, structural, and mechanical properties of en aw-6082 and en aw-7075 welded joints," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/ma14164349.
- [10] A. Kyröläinen, W. Vilpas, and H. Hänninen, "Use of stainless steels in bus coach structures," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 9, no. 6, pp. 669–677, 2000, doi: 10.1361/105994900770345548.
- [11] F. de S. Gerken, "Perfis tubulares: aspectos arquitetônicos e estruturais," *Univ. Fed. Ouro Preto, Pós-Graduação em Eng. Civ.*, 2003, [Online]. Available: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6309>
- [12] Y. B. Shao, "Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular T- and K-joints under axial loading," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 63, no. 10, pp. 1351–1360, 2007, doi: 10.1016/j.jcsr.2006.12.005.
- [13] M. S. Zhao, C. K. Lee, T. C. Fung, and S. P. Chiew, "Impact of welding on the strength of high performance steel T-stub joints," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 131, pp. 110–121, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.12.023.
- [14] J. Bączkiewicz, M. Malaska, S. Pajunen, and M. Heinisuo, "Parametric study on

- axially loaded square hollow section T-joints at elevated temperature," *Fire Saf. J.*, vol. 122, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103359.
- [15] S. Nandhakumar, S. Seenivasan, A. M. Saalih, and M. Saifudheen, "Weight optimization and structural analysis of an electric bus chassis frame," *Mater. Today Proc.*, vol. 37, no. Part 2, pp. 1824–1827, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.404.
- [16] V. Gheorghe, M. L. Scutaru, V. B. Ungureanu, E. Chircan, and M. Ulea, "New design of composite structures used in automotive engineering," *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/sym13030383.
- [17] T. Ishikawa *et al.*, "Overview of automotive structural composites technology developments in Japan," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 155, pp. 221–246, 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.09.015.
- [18] "Grupo Ferpinta." <http://www.ferpinta.pt/> (accessed Jan. 14, 2022).
- [19] NP EN 1993, "Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios," *Rev. da Esc. Enferm.*, vol. 45, no. 5, pp. 1055–1061, 1993.
- [20] NP EN 1993, "Eurocódigo 3: Parte 1–2: Verificação da resistência ao fogo," 2010.
- [21] "Tubos Mecânicos", [Online]. Available: <https://tubosmecanicos.es/pt/>
- [22] P. Soares, *AÇOS - Características, Tratamentos*, 6ª Edição. Publindústria, 2009.
- [23] M. Sun and J. A. Packer, "Charpy V-notch impact toughness of cold-formed rectangular hollow sections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 97, pp. 114–126, 2014, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.02.005.
- [24] F. Silva, *Tecnologia da Soldadura - Uma Abordagem Técnico-Didática*, 2.ª Edição. Publindústria, 2016.
- [25] "American Welding Society." <https://www.aws.org/home> (accessed Nov. 02, 2021).
- [26] L. A. Pereira, "Estudo da Soldabilidade do Ferro Fundido Sibodur 450," *Inst. Super. Eng. do Porto, Mestr. em Eng. Mecânica*, 2016, [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/9955>
- [27] SUMIG, "Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG." <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag> (accessed Nov. 28, 2021).
- [28] S.-G. Luz, "O que é a soldagem MIG, MAG ou GMAW?" <https://www.soldagem.gelsonluz.com/2018/09/o-que-e-soldagem-mig-mag-ou-gmaw.html> (accessed Jan. 15, 2022).
- [29] P. E. Kraft Lopes, A. Machado, and F. Gruber Colaço, "Efeito Do Ângulo Da Tocha Na Penetração Do Cordão Com Transferência Metálica Por Spray," no. January, 2017, doi: 10.26678/abcm.cobef2017.cof2017-0906.
- [30] INFOSOLDA, "Processo MIG/MAG - Parâmetros de soldagem." <https://infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/174-processo-mig-mag-parametros-desoldagem> (accessed Nov. 28, 2021).
- [31] M. Suban and J. Tušek, "Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 119, no. 1–3, pp. 185–192, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00940-2.
- [32] D. Souza, A. A. de Resende, and A. Scotti, "A qualitative model to explain the

- polarity influence on the fusion rate in the MIG/MAG process,” *Soldag. e Insp.*, vol. 14, no. 3, pp. 192–198, 2009, doi: 10.1590/s0104-92242009000300002.
- [33] T. M. D. Borba, R. S. Oliveira, H. R. Gama, M. F. de O. Caizer, and L. de O. Turani, “Avaliação da soldabilidade do aço sincron em 10025-4 S355M aplicado na fabricação de torres eólicas com processo de soldagem de alta deposição,” *Soldag. e Insp.*, vol. 22, no. 4, pp. 413–428, 2017, doi: 10.1590/0104-9224/SI2204.12.
- [34] J. Klusák and S. Seitzl, “Very high cycle fatigue tests of high strength steels S355 J0 and S355 J2,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 17, pp. 576–581, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.077.
- [35] K. H. Nip, L. Gardner, C. M. Davies, and A. Y. Elghazouli, “Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 1, pp. 96–110, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.JCSR.2009.08.004.
- [36] A. Jacob, A. Mehmanparast, R. D’Urzo, and J. Kelleher, “Experimental and numerical investigation of residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of S355 steel weldments,” *Int. J. Fatigue*, vol. 128, no. January, p. 105196, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105196.
- [37] Z. Mikulski and T. Lassen, “Crack growth in fillet welded steel joints subjected to membrane and bending loading modes,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 235, no. May, p. 107190, 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107190.
- [38] J. Taylor, A. Mehmanparast, R. Kulka, and P. Moore, “Correlation between steel initiation toughness and arrest toughness determined from small-scale mechanical testing,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 17, pp. 472–478, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.062.
- [39] J. Schubnell, “Application of different simulation approaches to numerically optimize high-frequency mechanical impact (HFMI) post-treatment process,” vol. Weld World, pp. 725–738, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00701-8>.
- [40] D. Forni, B. Chiaia, and E. Cadoni, “High strain rate response of S355 at high temperatures,” *Mater. Des.*, vol. 94, pp. 467–478, 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.160.
- [41] NP EN 1993-1-8, “Norma Portuguesa - Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço,” *Inst. Port. da Qual.*, p. 146, 2010.
- [42] LNEC, “Eurocódigos publicados,” 2021. http://www.lnec.pt/fotos/editor2/QPE/eurocodigos_publicados.pdf
- [43] H. Veríssimo, “Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio de Acordo com o Eurocódigo 3,” *Inst. Super. Técnico*, no. August, 2008, doi: 10.13140/RG.2.1.1359.6409.
- [44] V. Lúcia and M. Azevedo, “Dimensionamento de Uma Cobertura em Elementos Estruturais de Aço Enformados a Frio,” *Inst. Super. Eng. do Porto, Mestr. em Eng. Civ.*, 2015, [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/7108>
- [45] P. N. da C. Oliveira, “Análise térmica de perfis em aço protegidos e não protegidos sob ação do fogo,” *Inst. Super. Eng. do Porto, Mestr. em Eng. Mecânica*, 2020, [Online]. Available: <https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/17222>
- [46] R. D. S. G. Campilho, *Método de Elementos Finitos - Ferramentas para Análise Estrutural*. Publindústria, 2012.

- [47] L. J. Hart-Smith, "Stress analysis: a continuum mechanics approach, in Developments in Adhesives 2." Applied Science Publishers, 1981.
- [48] Aberdeen Group, "Impacto da Simulação sobre a Rentabilidade do Produto." [Online]. Available: <https://www.aberdeen.com/>
- [49] K. Dems and Z. óz, "Multiparameter structural shape optimization by the finite element method," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 247–263, 1978, doi: 10.1002/nme.1620130204.
- [50] E. Schnack, "An optimization procedure for stress concentrations by the finite element technique," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 115–124, 1979, doi: 10.1002/nme.1620140109.
- [51] F. Goedel, I. Iturrioz, A. Dias De Meira, and M. Walber, "Simulação numérica da estrutura de um ônibus rodoviário submetida a impacto semifrontal contra uma parede rígida," *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, vol. 32, no. 1, pp. 22–30, 2016, doi: 10.1016/j.rimni.2014.10.001.
- [52] C. Jorge *et al.*, "Modelação e Auxílio ao Projecto de Estrutura de Autocarros com base em Software de Elementos Finitos Realizado na CaetanoBus," *Fac. Eng. da Univ. do Porto, Mestr. Integr. em Eng. Mecânica*, 2008.
- [53] D. Rincón-Dávila, E. Alcalá, and Martín, "Theoretical-experimental study of the repair of steel bus structures after rollover," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 162, p. 105734, 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105734.
- [54] J. Karliński, M. Ptak, P. Działak, and E. Rusiński, "Strength analysis of bus superstructure according to Regulation No. 66 of UN/ECE," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 342–353, 2014, doi: 10.1016/j.acme.2013.12.001.
- [55] D. Lavayen-Farfan, M. J. L. Boada, and J. A. Rodriguez-Hernandez, "Bending collapse analysis for thin and medium-thin-walled square and rectangular hollow shapes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 165, no. May, p. 107934, 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.107934.
- [56] M. S. Saffirna, X. X. Jiang, M. R. M. Rejab, K. S. Lim, N. N. Guo, and W. Bangle, "A study on simulation analysis for laser-welded I-core sandwich plate with different material properties and T-joint weld characteristic," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.289.
- [57] D. Pojani and D. Stead, "Sustainable urban transport in the developing world: Beyond megacities," *Sustain.*, vol. 7, no. 6, pp. 7784–7805, 2015, doi: 10.3390/su7067784.
- [58] Salvador Caetano, "About Our Story-Salvador Caetano." <https://salvadorcaetano.pt/en/about-us/our-history/> (accessed Apr. 20, 2022).
- [59] "ESAB Portugal." <https://pt.esab.net/pt/pt/index.cfm> (accessed Apr. 05, 2022).
- [60] G. Gas-shielded and C. Skodras, "Weld G3Si1," vol. 5, p. 13, 2012.
- [61] "Air Products." <https://www.airproducts.com/> (accessed Apr. 05, 2022).
- [62] British Standard, "EN 10210-1."
- [63] British Standard, "EN 10210-2." 2006.
- [64] British Standard, "EN 10219-1."
- [65] British Standard, "EN 10219-2."
- [66] "'Solidworks 2020' Release 2020."

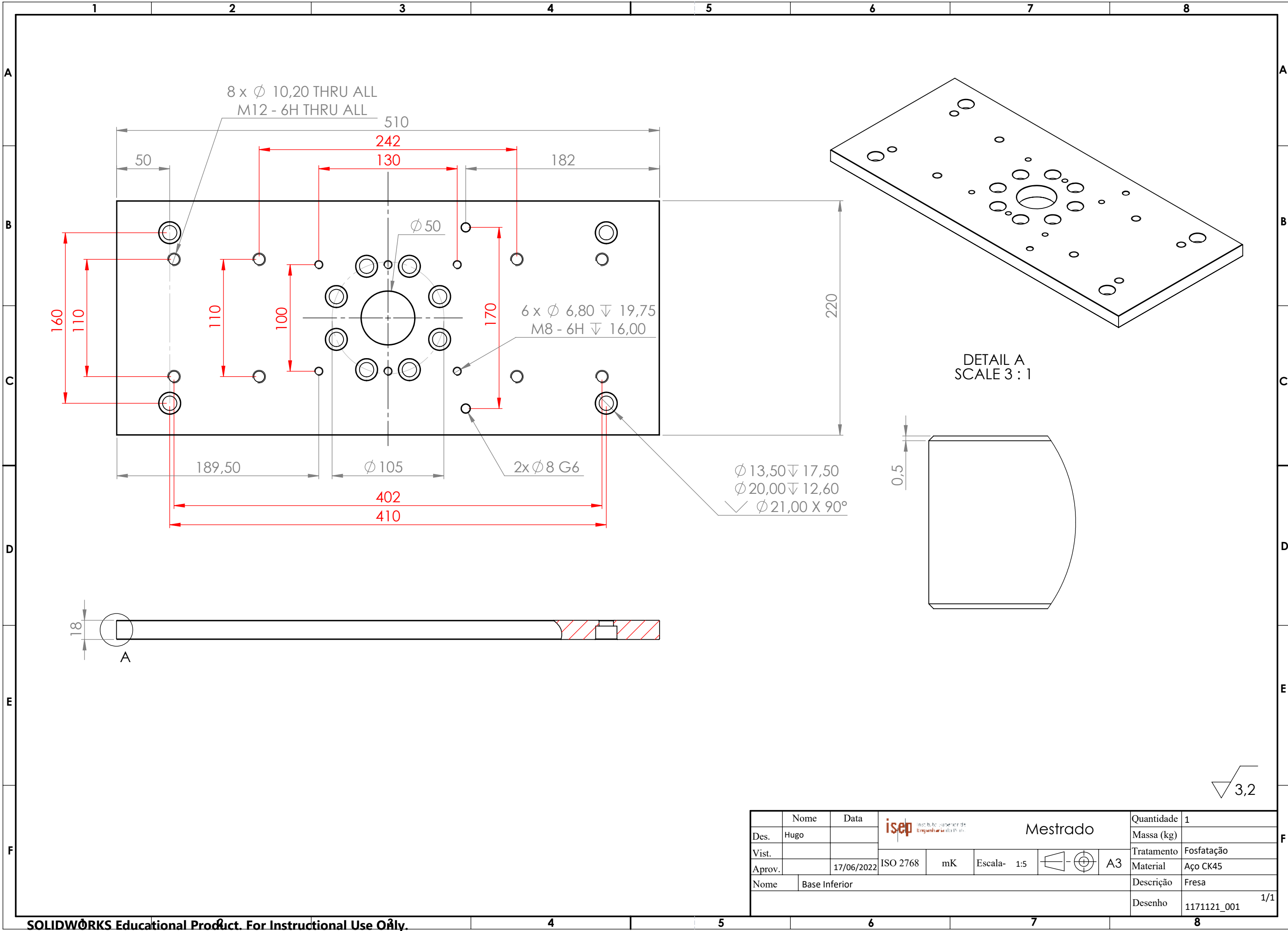
- [67] F. O. Mendanha, "Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo k e kt," p. 128, 2006.
- [68] F. C. Mendes, A. Maria, and S. Freitas, "Engenharia," vol. 65, no. 2, pp. 175–180, 2012.
- [69] "HBM", [Online]. Available:
https://www.hbm.com/?hbmcampaignid=ADWORDS&gclid=CjwKCAjwlqOXBhBqEiwA-hhitB9cRxnZS5nSMm-mHpMy7-ug08SY3187ODPNrSmmPoEIAxj8Q9GK6hoC-FUQAvD_BwE

ANEXOS

6.1 Desenhos das ferramentas para ensaios

6 ANEXOS

6.1 Desenhos das ferramentas para ensaios



8 x Ø 10,20 THRU ALL
M12 - 6H THRU ALL

242

130

182

Ø 50

6 x Ø 6,80 ∇ 19,75
M8 - 6H ∇ 16,00

2x Ø 8 G6

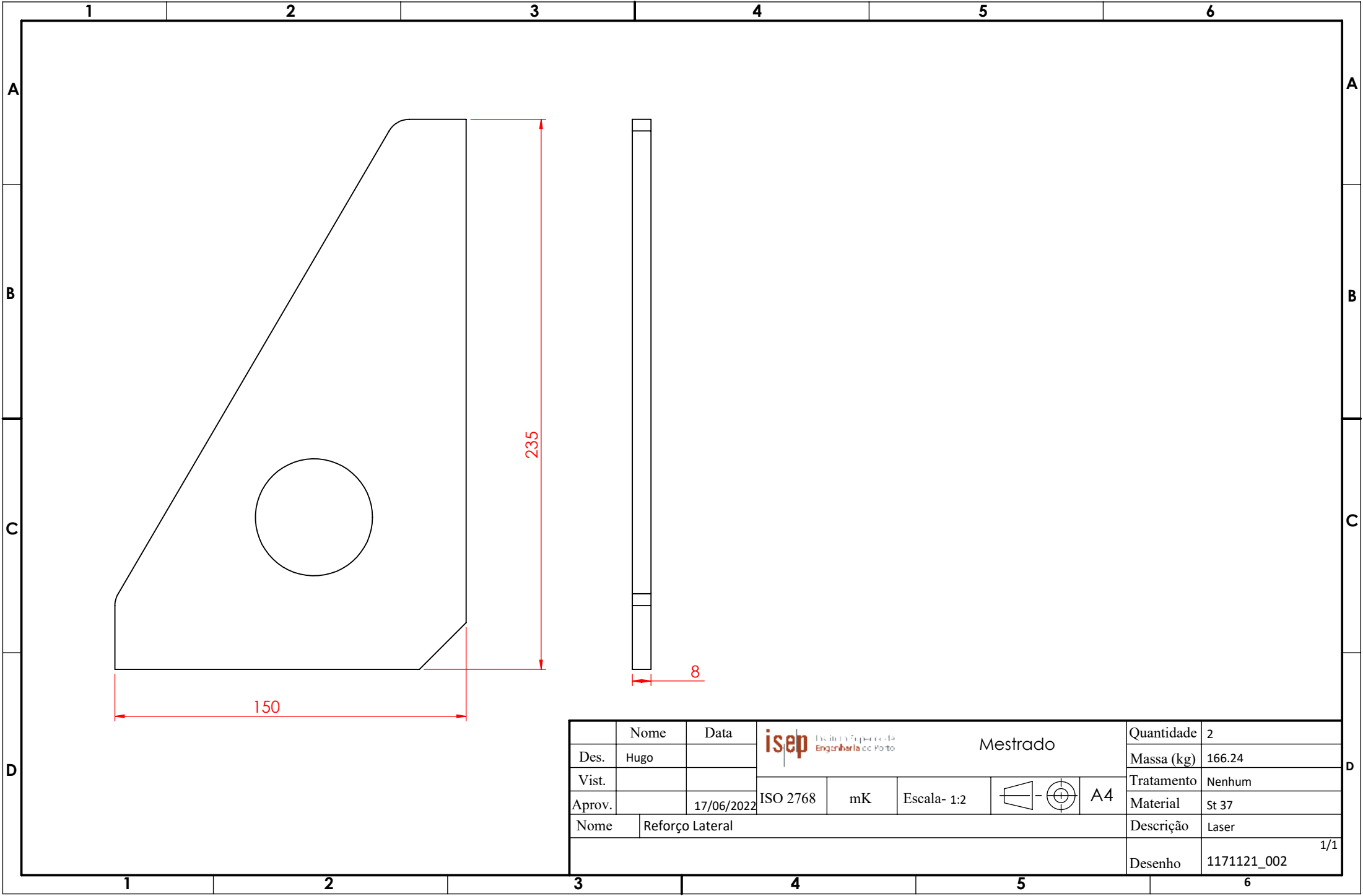
Ø 13,50 ∇ 17,50
Ø 20,00 ∇ 12,60
✓ Ø 21,00 X 90°

DETAIL A
SCALE 3 : 1

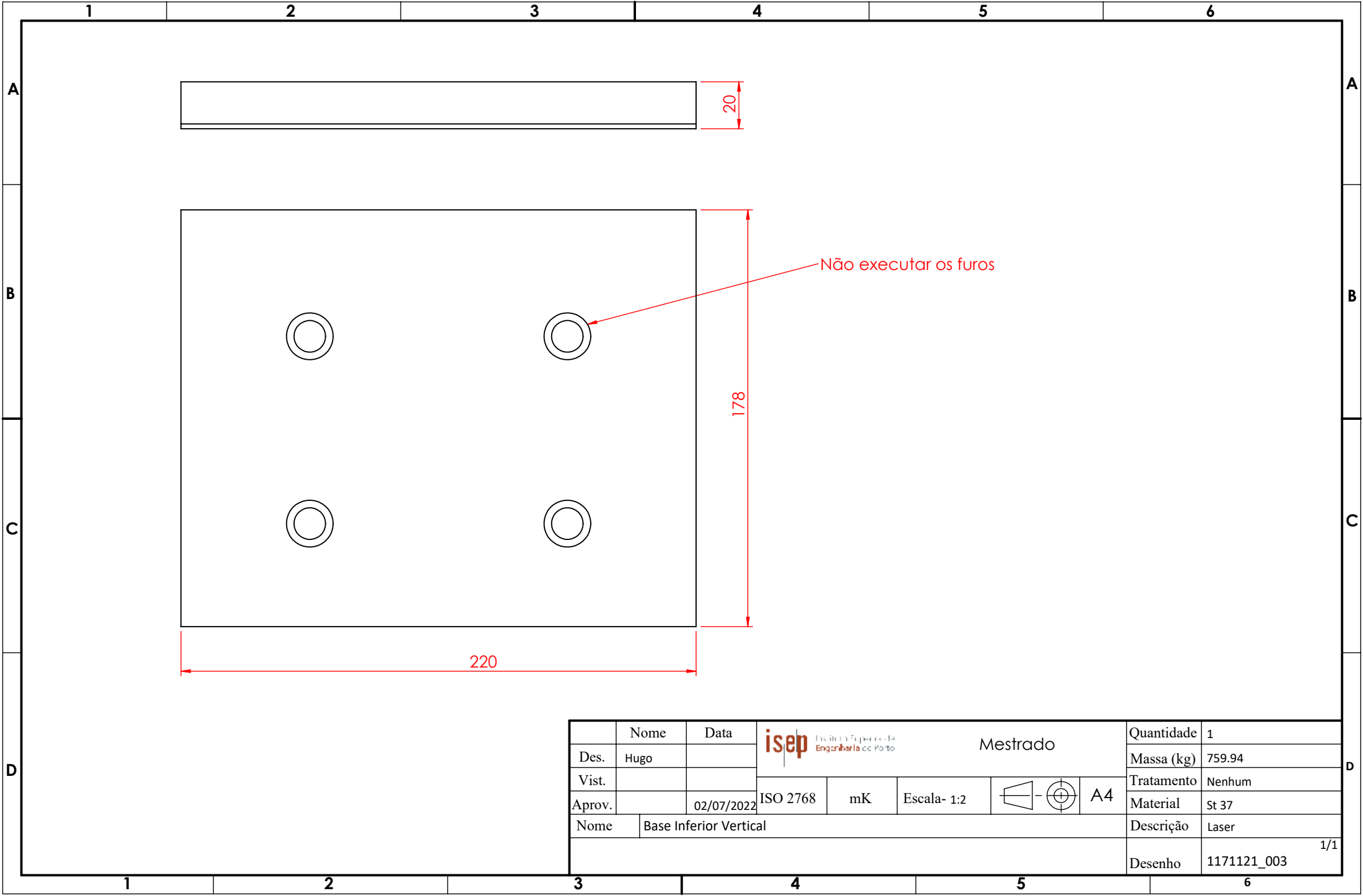
0,5

3,2

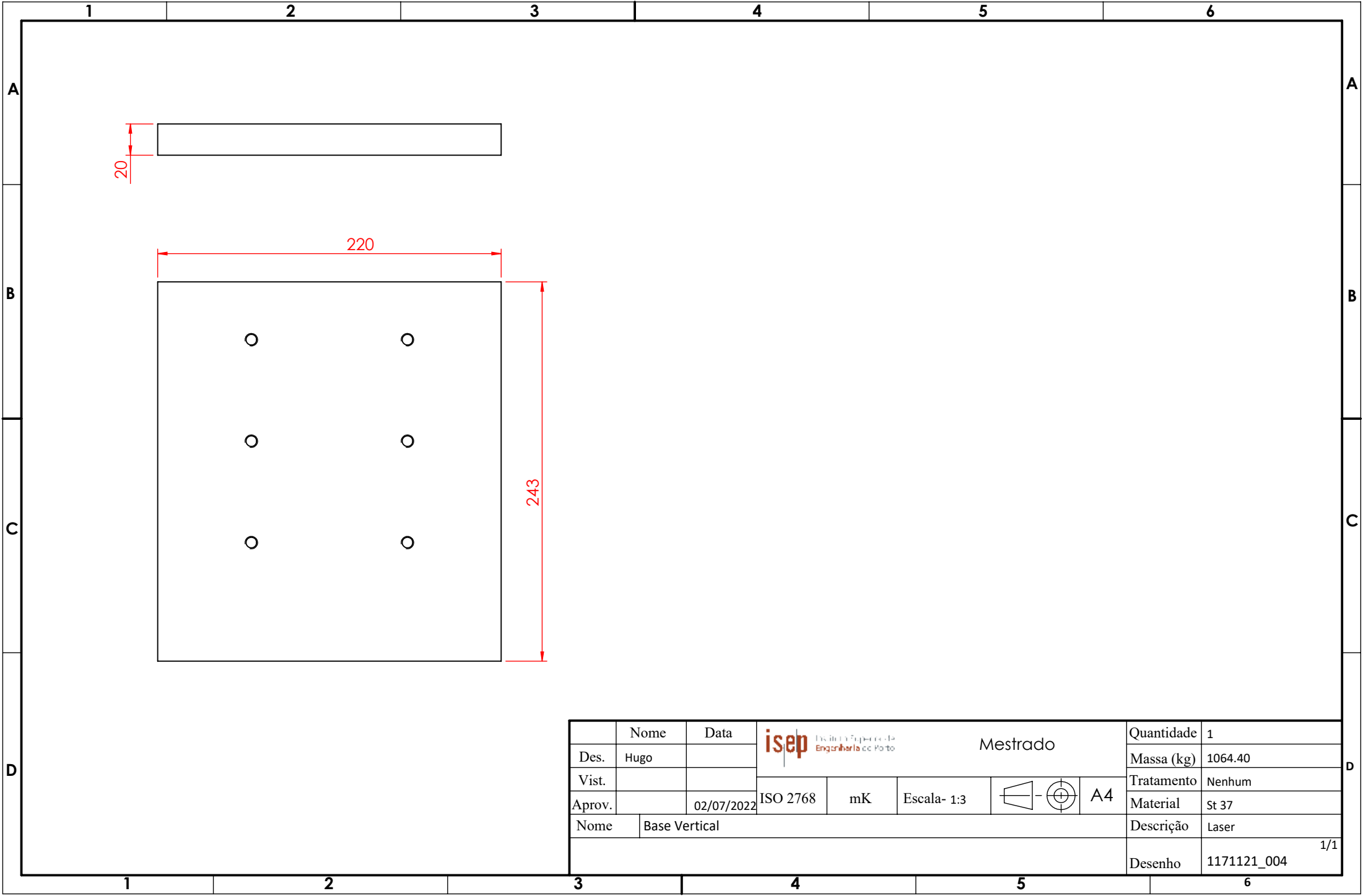
	Nome	Data	isep instituto superior de engenharia do porto Mestrado					Quantidade	1
Des.	Hugo							Massa (kg)	
Vist.							Tratamento	Fosfatação	
Aprov.		17/06/2022	ISO 2768	mK	Escala- 1:5		A3	Material	Aço CK45
Nome		Base Inferior						Descrição	Fresa
								Desenho	1171121_001 1/1



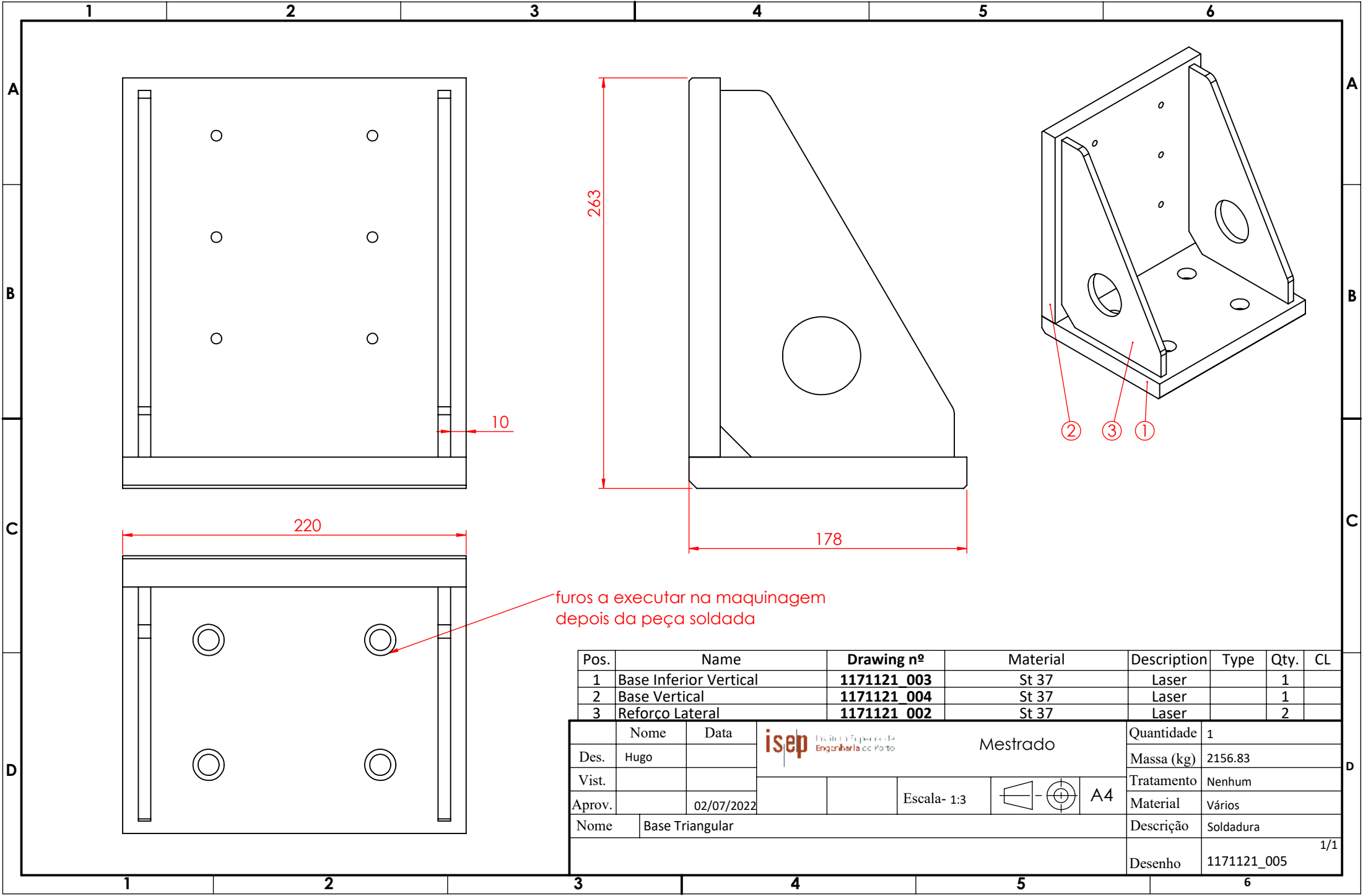
	Nome	Data	isep Faculdade Superior de Engenharia do Porto Mestrado					Quantidade	2	
Des.	Hugo							Massa (kg)	166.24	
Vist.								Tratamento	Nenhum	
Aprov.		17/06/2022	ISO 2768	mK	Escala- 1:2		A4	Material	St 37	
Nome		Reforço Lateral							Descrição	Laser
								Desenho	1171121_002	
									1/1	

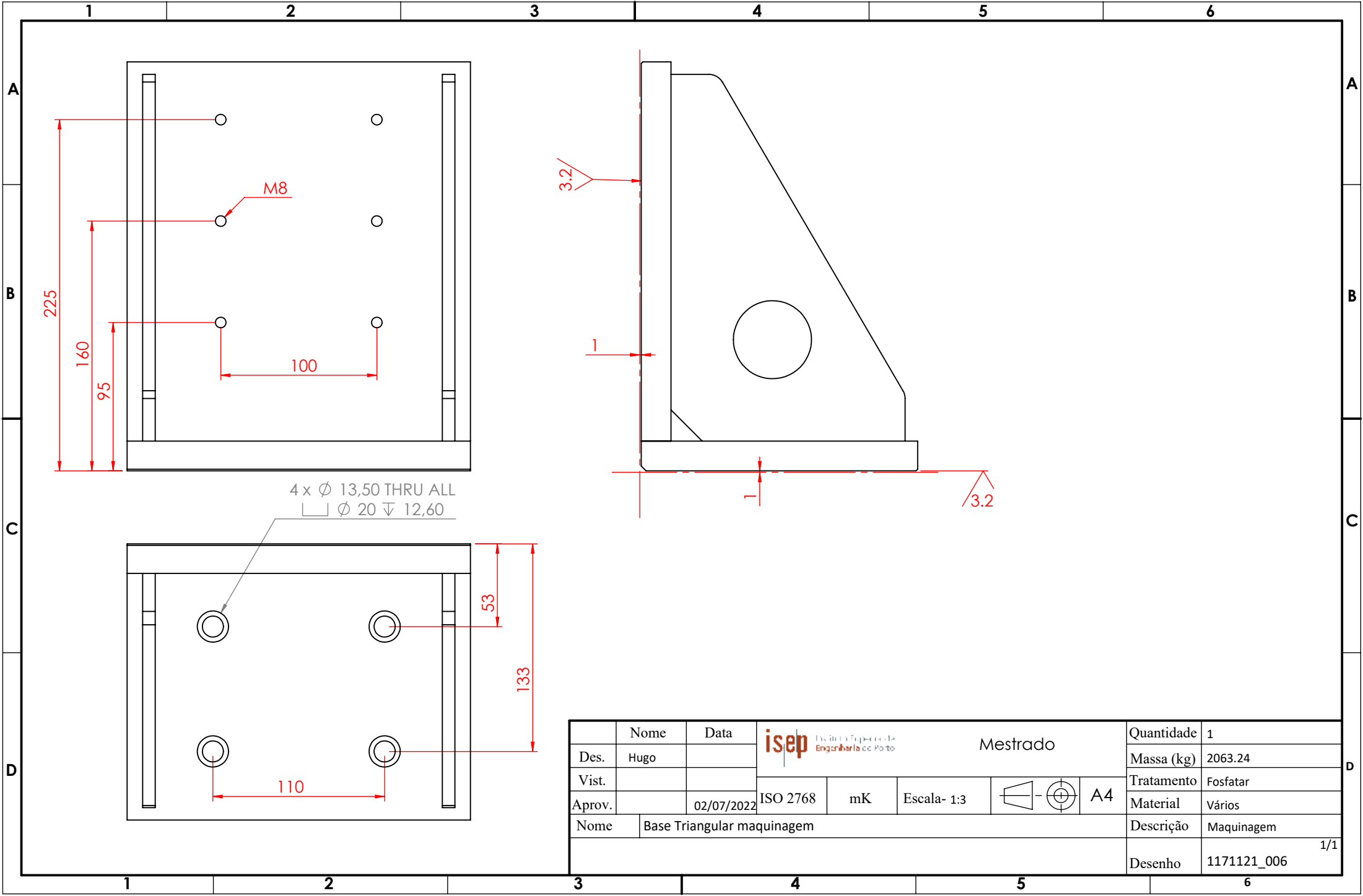


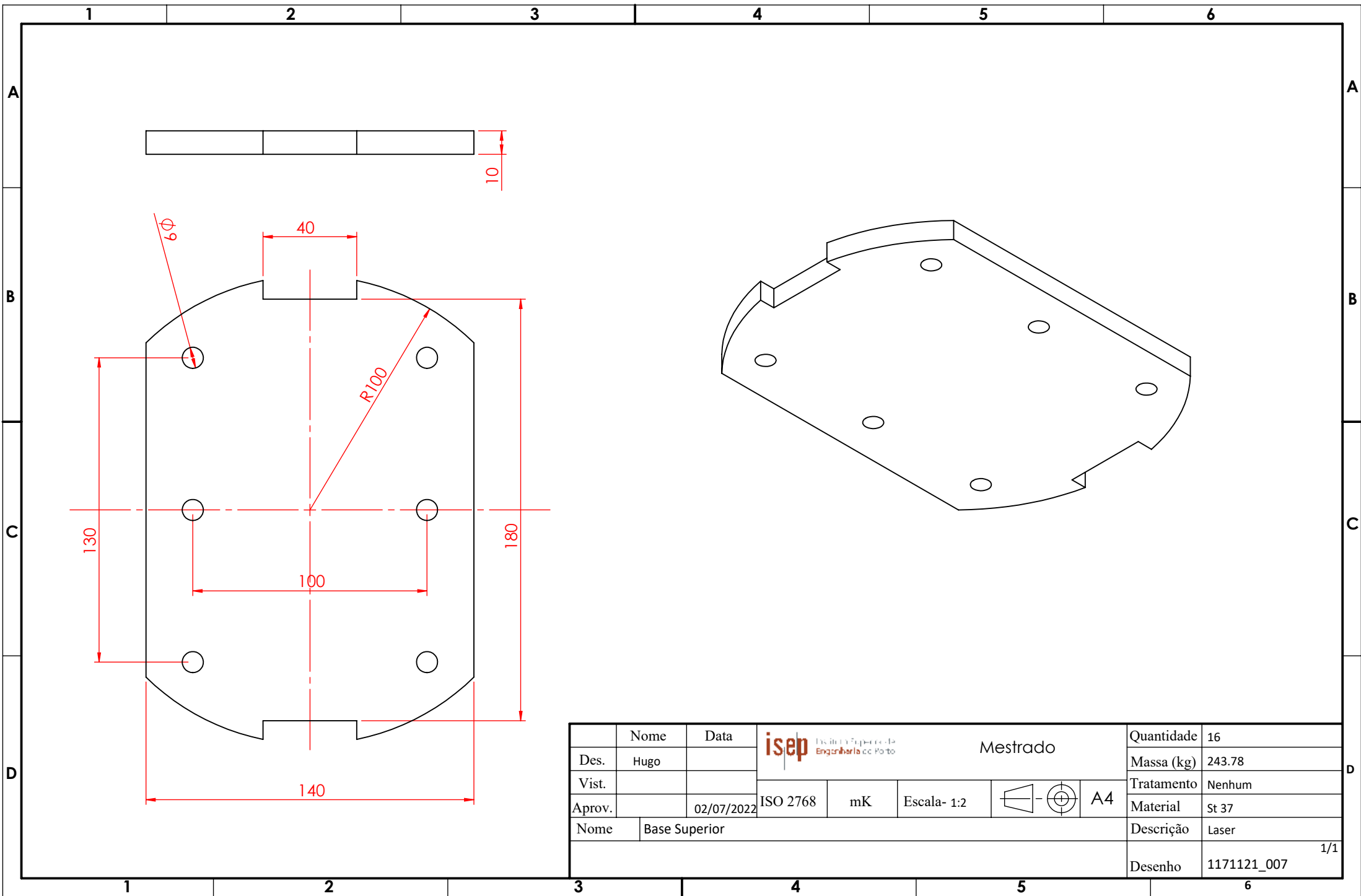
	Nome	Data	isep Instituto Superior de Engenharia do Porto Mestrado					Quantidade	1	
Des.	Hugo							Massa (kg)	759.94	
Vist.								Tratamento	Nenhum	
Aprov.		02/07/2022						ISO 2768	mK	Escala- 1:2
Nome		Base Inferior Vertical							Descrição	Laser
									Desenho	1171121_003
										1/1



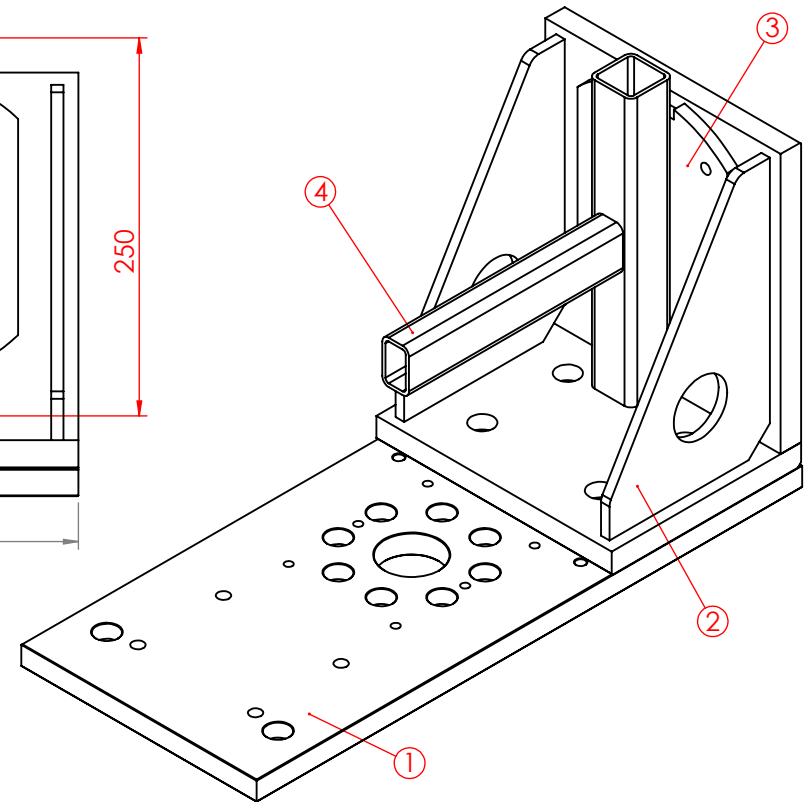
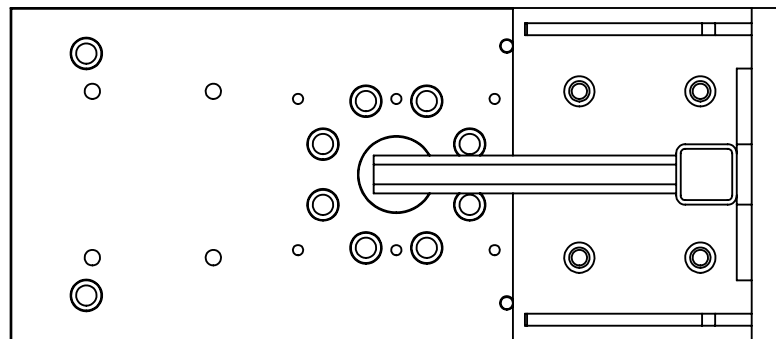
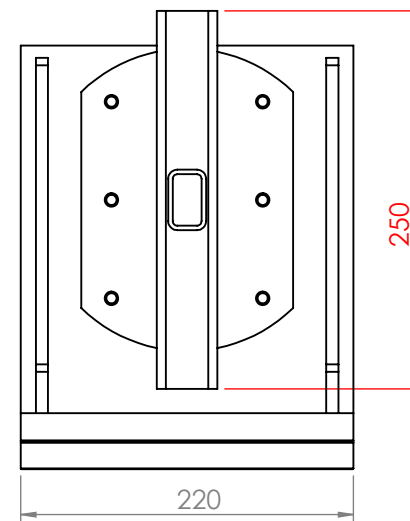
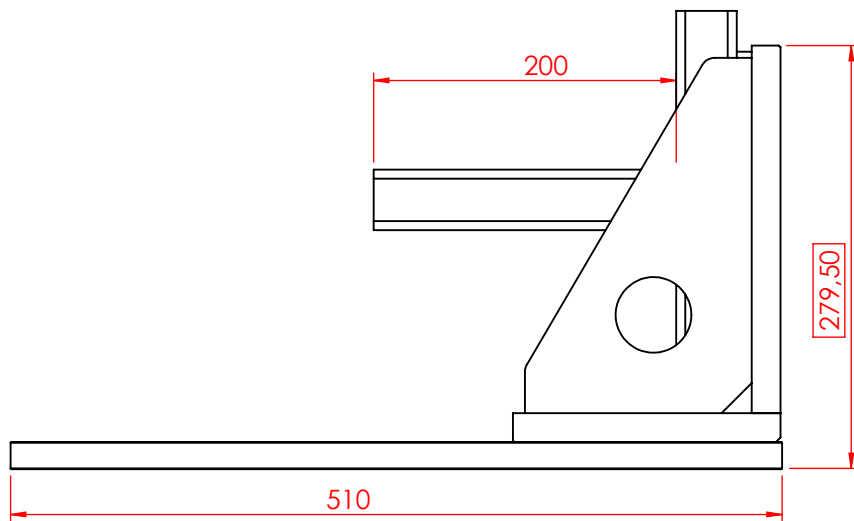
	Nome	Data	isep Faculdade Superior de Engenharia do Porto Mestrado					Quantidade	1
Des.	Hugo							Massa (kg)	1064.40
Vist.			ISO 2768	mK	Escala- 1:3		A4	Tratamento	Nenhum
Aprov.		02/07/2022						Material	St 37
Nome		Base Vertical						Descrição	Laser
								Desenho	1171121_004 1/1







	Nome	Data	isep Instituto Superior de Engenharia do Porto Mestrado					Quantidade	16
Des.	Hugo							Massa (kg)	243.78
Vist.								Tratamento	Nenhum
Aprov.		02/07/2022	ISO 2768	mK	Escala- 1:2		A4	Material	St 37
Nome		Base Superior						Descrição	Laser
								Desenho	1171121_007
									1/1



Pos.	Name	Drawing nº	Material	Description	Type	Qty.	CL
1	Base Inferior	1171121_001	Aço CK45	Fresa		1	
2	Base Triangular maquinagem	1171121_006	Vários	Maquinagem		1	
3	Base Superior	1171121_007	St 37	Laser		1	
4	Junta					1	

Nome		Data	isep Insititudo Superior de Engenharia do Porto Mestrado				Quantidade	1
Des.	Hugo						Massa (kg)	4387.79
Vist.							Tratamento	Nenhum
Aprov.		02/07/2022	ISO 2768	mK	Escala- 1:5		Material	Vários
Nome		Ferramenta Ensaio Flexão					Descrição	Oficina
							Desenho	1171121_008
								1/1