

**Avaliação do desempenho de ligações tubulares em
estruturas de veículos pesados de passageiros por
simulação numérica**

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Construções Mecânicas

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



26 de Novembro de 2012

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do
Mestrado em Construções Mecânicas

Candidato: Sandro Duarte da Rocha Rodrigues, Nº 1021111,
1021111@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo, jfj@isep.ipp.pt

Co-Orientação: Fernando José Ferreira, fjf@isep.ipp.pt

Mestrado em Construções Mecânicas
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



26 de Novembro de 2012

Dedicada à minha família e a quem me acompanhou nestes últimos tempos...

Agradecimentos

Queria expressar os meus agradecimentos a quem tornou este trabalho possível e pela toda a ajuda e contribuição que me deram durante todo o trabalho, no qual tenho de agradecer ao Sr. Eng.º Jorge Justo e Sr. Eng.º Fernando Ferreira pelo tempo que dispuseram para que esta Dissertação fosse realizada com sucesso.

Gostaria de agradecer à minha família e a quem me acompanhou durante este tempo de trabalho, todo o apoio que me deram.

Resumo

Nesta Dissertação ir-se-à avaliar o desempenho de algumas ligações existentes nos veículos pesados de passageiros, através do Regulamento Eurocódigo 3. Nos últimos anos ocorreram diversos acidentes envolvendo este tipos de veículos, em que os mesmos causaram vítimas mortais e feridos graves. Serão testadas por simulação numérica algumas ligações pertencentes a elementos constituintes da superestrutura, em que esta é normalmente afectada com a ocorrência de acidentes. Assim sendo, o estudo de nós de ligação tem uma importância fulcral para que uma superestrutura suporte situações extremas e que resista a solicitações externas aplicadas.

Iniciou-se esta Dissertação com o estudo da sinistralidade e de acidentes que envolvem veículos pesados de passageiros. No capítulo 2 abordou-se um programa que promove simulações numéricas de acidentes e estudo do comportamento dos passageiros em caso de acidente, sendo referido o Regulamento que homologa os veículos pesados de passageiros e os seus principais métodos. Abordaram-se os principais constituintes da estrutura de um veículo pesado de passageiros.

No capítulo 3, é referido o Eurocódigo 3 em termos do estudo das ligações tubulares usadas neste tipo de veículos.

No capítulo 4, fez-se o estudo e selecção de elementos a utilizar para a simulação numérica de casos preconizados pelo Eurocódigo 3 e estudaram-se três tipos de ligações que são usadas na construção da superestrutura deste tipo de veículos, tendo-se retirado conclusões deste estudo.

Palavras-Chave

Estudo de ligações tubulares, Capotamento, Eurocódigo 3, Regulamento *UNECE R66*, Veículos pesados de passageiros, Método dos Elementos Finitos, Selecção de elementos finitos, Abaqus®.

Abstract

In this thesis the performance of some existing joints used in the construction of passenger cars will be evaluated according to Regulation Eurocode 3. In past few years have occurred several accidents involving these types of vehicles, in which they have caused deaths and serious injuries. Some elements of the superstructure will tested by numerical simulation, which normally affected with the occurrence of accidents. Thus, the study of joints has a central importance for a superstructure.

This thesis beginning with the study of accidents and accidents involving passenger cars. In chapter 2 it has a program that promotes numerical simulations of accidents and the study of the behaviour of occupants in case of accidents, being referred the Regulation that endorses the superstructure resistance in case of a rollover and its methods. It was studied the structural components of a superstructure.

In chapter 3, it is referred the Eurocode 3 in terms of the study of tubular joints used in this type of vehicles.

In chapter 4, it has been made the study and selection of finite elements to use in numerical simulation and studied three types of joints that are used in the superstructure of this types of vehicles.

Keywords

Tubular joints, Rollover, Eurocode 3, *UNECE R66* Regulation, Passenger cars, Finite element method, Finite element selection, Abaqus®.

Índice

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
ACRÓNIMOS E CARACTERES	XXIII
ACRÓNIMOS	XXIII
CARACTERES ROMANOS	XXIV
CARACTERES GREGOS	XXVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO E CONTEXTO DO TRABALHO DESENVOLVIDO	2
1.2. ESTUDO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES ENVOLVENDO VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS EM PORTUGAL	2
1.3. OBJECTIVOS DESTE ESTUDO	7
1.4. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS NÓS DE LIGAÇÃO NA SUPERESTRUTURA DE VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS.....	8
2. ESTADO DA ARTE	10
2.1. CARACTERIZAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS.....	11
2.1.1. CHASSI DE UM VEÍCULO PESADO DE PASSAGEIROS	11
2.1.2. SUPERESTRUTURA DE UM VEÍCULO PESADO DE PASSAGEIROS	12
2.2. ESTUDOS DESENVOLVIDOS PARA ACIDENTES ENVOLVENDO VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS (PROJECTO <i>ECBOS</i>)	16
2.2.1. MODELOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA ESTRUTURAS DE VEÍCULOS.....	17
2.2.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM CASO DE ACIDENTE.....	19
2.2.3. INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MÉTODOS NUMÉRICOS MATEMÁTICOS	20
2.3. REGULAMENTO <i>UNECE R66</i> – HOMOLOGAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS QUANTO À RESISTÊNCIA DA SUPERESTRUTURA	21
2.3.1. DEFINIÇÃO E CAMPO DE APLICAÇÃO.....	21
2.3.2. ESPAÇO RESIDUAL	22
2.3.3. DEFINIÇÃO DA SUPERESTRUTURA	23
2.3.4. MÉTODO DE ENSAIO DO REGULAMENTO	23
2.3.5. SUGESTÕES DE APLICAÇÃO EM NOVOS REGULAMENTOS	24
2.4. REGULAMENTO <i>FMVSS220</i>	25
2.5. ENQUADRAMENTO DO PROCESSO DE HOMOLOGAÇÃO EM VEÍCULOS DE TRANSPORTES DE PASSAGEIROS.....	26
2.5.1. TIPOS DE VEÍCULOS DE TRANSPORTES	26
2.5.2. HOMOLOGAÇÃO DE VEÍCULOS PESADOS DE PASSAGEIROS, SEGUNDO A <i>DIRECTIVA 2007/46/CE</i>	27
2.6. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	28
2.6.1. PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO MEF.....	28
2.6.2. PROGRAMAS INFORMÁTICOS EXISTENTES	29
2.6.3. ELEMENTOS FINITOS EXISTENTES (<i>ABAQUS</i> ® 6.11-1)	30

3. EUROCÓDIGO 3	34
3.1. REGULAMENTO EUROCÓDIGO 3.....	35
3.2. PRINCÍPIO PARA O DIMENSIONAMENTO SEGUNDO O REGULAMENTO EUROCÓDIGO 3	35
3.3. ESTUDO DE CASOS DO EUROCÓDIGO 3	41
3.3.1. CASO 1.....	41
3.3.1.1. CÁLCULOS EFECTUADOS PARA O CASO 1	43
3.3.2. CASO 2.....	44
3.3.2.1. CÁLCULOS EFECTUADOS PARA O CASO 2	44
3.3.3. CASO 3.....	48
3.3.3.1. CÁLCULOS EFECTUADOS PARA O CASO 3	49
4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	52
4.1. SELECÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO A UTILIZAR NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	53
4.1.1. CONCLUSÕES DA SELECÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO	62
4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CASOS DO EUROCÓDIGO 3	63
4.2.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO 1 – LIGAÇÃO T	63
4.2.1.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS CRÍTICAS	65
4.2.1.2. PROPOSTAS DE MELHORIA CONSTRUTIVA	68
4.2.1.2.1. CASO 1 (REFORÇO COM $H=B/2$)	68
4.2.1.2.2. CASO 1 (REFORÇO COM $H=B$)	70
4.2.1.2.3. CASO 1 (REFORÇO COM $H=2B$)	72
4.2.1.2.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	74
4.2.1.2.5. CASO 1 (REFORÇO EM RAIOS CONCORDANTES E COM COMPRIMENTO DE 20 MM, COM $H=B/2$)	76
4.2.1.2.6. CASO 1 (REFORÇO EM RAIOS CONCORDANTES E COM COMPRIMENTO DE 40 MM, COM $H=B$).....	79
4.2.1.2.7. CASO 1 (REFORÇO EM RAIOS CONCORDANTES E COM COMPRIMENTO DE 80 MM, COM $H=2B$).....	81
4.2.1.2.8. CASO 1 (REFORÇO EM RAIOS CONCORDANTES – SEGUNDA CONFIGURAÇÃO).....	83
4.2.1.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO 1 – LIGAÇÃO T ENTRE TUBOS COM LARGURAS IGUAIS.....	85
4.2.1.3.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS CRÍTICAS	87
4.2.1.3.2. PROPOSTAS DE MELHORIA CONSTRUTIVA	89
4.2.1.4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	95
4.2.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO 2 – LIGAÇÃO K	99
4.2.2.1. CASO 2 (ROTURA DA FACE DA CORDA)	99
4.2.2.2. CASO 2 (CORTE NA CORDA).....	102
4.2.2.3. CASO 2 (ROTURA DO ELEMENTO DIAGONAL)	104
4.2.2.4. CASO 2 (PUNÇOAMENTO)	106
4.2.2.5. PROPOSTA DE MELHORIA CONSTRUTIVA.....	108
4.2.2.5.1. CASO 2 (ROTURA DA FACE DA CORDA – COM APLICAÇÃO DE REFORÇO)	108
4.2.2.5.2. CASO 2 (CORTE NA CORDA – COM APLICAÇÃO DE REFORÇO).....	110
4.2.2.5.3. CASO 2 (ROTURA DO ELEMENTO DIAGONAL – COM APLICAÇÃO DE REFORÇO)	112
4.2.2.6. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	114
4.2.3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO 3 – LIGAÇÃO EM COTOVELO SOLDADA	119
4.2.3.1. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS CRÍTICAS	120
4.2.3.2. PROPOSTAS DE MELHORIA CONSTRUTIVA	122
4.2.3.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	126
4.2.4. ANÁLISE NÃO LINEAR COM PLASTICIDADE – MÉTODO DE RIKS.....	127
4.2.4.1. ANÁLISE NÃO LINEAR – MATERIAL COM TENSÃO DE CEDÊNCIA DE 275 MPA	128
4.2.4.2. ANÁLISE NÃO LINEAR – AÇO S275-J2H	133
5. CONCLUSÕES	139
5.1. CONCLUSÕES FINAIS	140
5.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	144

Índice de Figuras

Figura 1 – Evolução da Sinistralidade em Portugal de 1989 a 2008 [1]	3
Figura 2 – Taxa de implicação de veículos pesados de passageiros (2003-2008), sendo a taxa de implicação definida entre o número de veículos envolvidos em acidentes com vítimas e o número total de veículos ($\times 1000$) [1]	4
Figura 3 – Índice de gravidade dos acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros [1]	6
Figura 4 – a) e b) Imagens de um acidente envolvendo um veículo pesado de passageiros	7
Figura 5 – Nó de ligação após ensaio de capotamento	8
Figura 6 – Pormenor de um nó de ligação existente num arco de segurança.....	9
Figura 7 – <i>Chassi</i> de veículo pesado de passageiros (M3)	11
Figura 8 - Exemplo de ligação entre o <i>chassi</i> e a carroçaria	12
Figura 9 – Secções de um modelo de veículo pesado de passageiros [4]	13
Figura 10 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de ligações existentes na Treliça Lateral [4] .	14
Figura 11 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em T [4].....	14
Figura 12 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em K [4]	15
Figura 13 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em junta de cotovelo soldada [4]	15
Figura 14 - Simulação de um modelo para o estudo do impacto frontal, desenvolvido pelo <i>CIC</i> e <i>TNO Automotive</i> [5]	17
Figura 15 - Simulação de um modelo para o estudo do capotamento, desenvolvido pelo <i>INSIA</i> e <i>POLITO</i> [5]	18
Figura 16 – Modelo para a simulação numérica de uma secção, desenvolvido pelo <i>INSIA</i> [5].....	18
Figura 17 - Simulação do ensaio de capotamento, recorrendo ao <i>software</i> de simulação <i>PAMCRASH</i> [®] , desenvolvido pelo <i>INSIA</i> [5]	19

Figura 18 – 1), 2), 3), 4), 5) e 6) Simulação da superestrutura com ocupantes (usando sistema de restrição), de acordo o regulamento <i>UNECE R66</i> , desenvolvido pelo <i>INSIA</i> [5].....	20
Figura 19 - Estudos estruturais em ligações, desenvolvido pelo <i>CIC</i> [5].....	21
Figura 20 - Especificação de Espaço residual, a) e c) Disposição lateral [6]	22
Figura 21 - Definição da superestrutura a partir da carroçaria [6]	23
Figura 22 - Ensaio de capotamento [6].....	24
Figura 23 – Método de ensaio segundo a norma <i>FMVSS 220 (NHTSA, 1991)</i>	25
Figura 24 - Ensaio segundo a norma <i>FMVSS 220 (NHTSA, 1991)</i>	26
Figura 25 - Simulação informática por MEF – Programa informático <i>ANSYS®</i>	29
Figura 26 – Estudo de zonas críticas através de programa de simulação informático – Programa informático <i>RADIOSS® (Motionsolve)</i>	30
Figura 27 – Elemento finito C3D8 [9]	30
Figura 28 – Elemento finito C3D8R [9].....	31
Figura 29 – Elemento finito C3D20 [9].....	31
Figura 30 – Elemento finito C3D20R [9].....	32
Figura 31 – Elemento finito C3D10 [9].....	32
Figura 32 – Elemento finito C3D15 [9].....	33
Figura 33 – Parâmetros geométricos de uma ligação em K com afastamento e com três perfis tubulares de secção quadrada, em que: 0 – tubo principal; 1 e 2 – tubos secundários [10].....	44
Figura 34 – Junta em cotovelo soldada [10]	49
Figura 35 – Curva de material elastoplástico	50
Figura 36 – Cálculo da posição do centróide do tubo 60x60x3 [mm].....	50
Figura 37 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60x60x3 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura.....	54

Figura 38 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60×60×6 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura.....	54
Figura 39 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60×60×8 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura.....	55
Figura 40 – Simulação de um tubo 40×40×3 [mm] encastrado numa das extremidades e sujeito a um momento flector previsto pelo Eurocódigo 3 (Factor de escala de deformação igual a 10x)	63
Figura 41 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira na junta soldada em T – Situação 1a	64
Figura 42 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento na junta em T – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	65
Figura 43 – Pormenor da zona de concentração de tensões – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)	66
Figura 44 – Representação do modelo completo, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material representada a cor preta – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)	66
Figura 45 – Pormenor da zona de concentração de tensões com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	67
Figura 46 – Pormenor geométrico para um reforço de comprimento de 20 mm, usado junto à zona de ligação tubo principal/tubo secundário	68
Figura 47 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=b/2$ – Situação 1b	69
Figura 48 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=b/2$ – Situação 1b (Factor de escala de deformação igual a 10x)	69
Figura 49 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=b/2$ – Situação 1b (Factor de escala de deformação igual a 10x)	70
Figura 50 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=b$ – Situação 1c	71

Figura 51 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=b$ – Situação 1c (Factor de escala de deformação igual a 10x)	71
Figura 52 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=b$ – Situação 1c (Factor de escala de deformação igual a 10x)	72
Figura 53 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=2b$ – Situação 1d	73
Figura 54 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=2b$ – Situação 1d (Factor de escala de deformação igual a 10x)	73
Figura 55 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=2b$ – Situação 1d (Factor de escala de deformação igual a 10x)	74
Figura 56 – Variação da máxima tensão a meio da ligação em função de comprimento de reforço/largura do tubo secundário	74
Figura 57 – Variação da máxima tensão no canto da ligação em função de comprimento de reforço/largura do tubo secundário	75
Figura 58 – Pormenor geométrico de reforço com raio concordante e com comprimento igual a 20 mm usado junto à zona de ligação tubo principal/tubo secundário	76
Figura 59 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e	77
Figura 60 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e (Factor de escala de deformação igual a 10x)	77
Figura 61 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	78
Figura 62 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f.....	79
Figura 63 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	80

Figura 64 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f (Factor de escala de deformação igual a 10x)	80
Figura 65 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g	81
Figura 66 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g (Factor de escala de deformação igual a 10x)	82
Figura 67 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio de concordância e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	82
Figura 68 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante (segunda configuração) ..	83
Figura 69 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	84
Figura 70 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal em que o reforço possui raio de concordância (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	84
Figura 71 – Simulação de um tubo 60x40x3 [mm] sujeito a um momento flector previsto pelo Eurocódigo 3 (Factor de escala de deformação igual a 10x)	85
Figura 72 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T (para tubos com larguras iguais) – Situação 1h.....	87
Figura 73 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento na junta soldada em T - (Factor de escala de deformação igual a 10x) – Situação 1h.....	87
Figura 74 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com tubos de larguras iguais – Situação 1h (Factor de escala de deformação igual a 10x)	88
Figura 75 – Pormenor da Zona de concentração de tensões, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – Situação 1h (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	88

Figura 76 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1i	89
Figura 77 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, em que o comprimento de reforço é igual à largura do tubo secundário – Situação 1i (Factor de escala de deformação igual a 10x)	90
Figura 78 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com um comprimento de reforço igual à largura do tubo secundário – Situação 1i (Factor de escala de deformação igual a 10x)	90
Figura 79 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j.....	91
Figura 80 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	91
Figura 81 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j (Factor de escala de deformação igual a 10x)	92
Figura 82 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço em raio concordante (segunda configuração)93	
Figura 83 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	93
Figura 84 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x) ...	94
Figura 85 – Pormenor geométrico da Ligação K.....	99
Figura 86 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação K, para a situação de Rotura da Face da Corda – Situação 2a.....	100
Figura 87 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de rotura da face da corda (rotura a face do tubo principal) – Situação 2a (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	101

Figura 88 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de rotura da face da corda – Situação 2a (Factor de escala de deformação igual a 10x)	101
Figura 89 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira à ligação K, para a situação de corte na corda – Situação 2b	102
Figura 90 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de Corte na corda ou corte no tubo principal – Situação 2b (Factor de escala de deformação igual a 10x)	103
Figura 91 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de corte na corda – Situação 2b (Factor de escala de deformação igual a 10x)	103
Figura 92 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira à ligação K, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2c	104
Figura 93 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de rotura do elemento diagonal – Situação 2c (Factor de escala de deformação igual a 10x)	105
Figura 94 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de rotura do elemento diagonal – Situação 2c (Factor de escala de deformação igual a 10x)	105
Figura 95 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação K, para a situação de Punçamento – Situação 2e	106
Figura 96 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de punçamento – Situação 2e (Factor de escala de deformação igual a 10x)	107
Figura 97 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de punçamento – Situação 2e (Factor de escala de deformação igual a 10x)	107
Figura 98 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação em K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 (Rotura da face da corda) – Situação 2f	109
Figura 99 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para a situação de rotura da face da corda – Situação 2f (Factor de escala de deformação igual a 10x)	109
Figura 100 – Pormenor da zona de ligação com aplicação de reforço, para a situação de Rotura da face da corda (Factor de escala de deformação igual a 10x) – Situação 2f	110

Figura 101 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 (Corte na corda) – Situação 2g	111
Figura 102 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , e com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para a situação de Corte na corda – Situação 2g (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	111
Figura 103 – Pormenor da zona de ligação com aplicação de reforço, para a situação de Corte na corda – Situação 2g (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	112
Figura 104 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma junta em K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 - (Rotura do elemento diagonal) – Situação 2h	113
Figura 105 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , e com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2h (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	113
Figura 106 – Pormenor da zona de ligação, com aplicação de reforço, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2h (Factor de escala de deformação igual a 10x)	114
Figura 107 – Simulação de um tubo 60x60x3 [mm] sujeito a um momento flector para a condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,20$ (Factor de escala de deformação igual a 10x)	119
Figura 108 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° – Situação 3a.....	120
Figura 109 – Malha de elementos finitos para junta em cotovelo soldada, ligada através de dois tubos 60x60x3 mm ³ – Situação 3a (Factor de escala de deformação igual a 10x)	121
Figura 110 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada – Situação 3a (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	121
Figura 111 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° e com reforço aplicado segundo Eurocódigo 3 – Situação 3b	122
Figura 112 – Malha de elementos finitos para a junta em cotovelo soldada, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 – Situação 3b (Factor de escala de deformação igual a 10x). 123	
Figura 113 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada, com aplicação de reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 – Situação 3b (Factor de escala de deformação igual a 10x). 123	

Figura 114 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° e reforçada com dois tipos de reforço – Situação 3c.....	124
Figura 115 – Malha de elementos finitos para a junta em cotovelo soldada, com aplicação de dois reforços em simultâneo – Situação 3c (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	125
Figura 116 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada, com aplicação de dois reforços em simultâneo – Situação 3c (Factor de escala de deformação igual a 10x).....	125
Figura 117 – Evolução de um comportamento não linear em função da carga P aplicada e deslocamento.....	128
Figura 118 – Curva de comportamento do material utilizado na primeira simulação com análise não linear.....	128
Figura 119 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira na simulação com plasticidade de uma junta soldada em T.....	129
Figura 120 – Controlo de deslocamento num ponto pertencente ao tubo secundário.....	129
Figura 121 – Resultados da análise não linear com plasticidade: a) Factor de carga = 0; b) Factor de carga = 0.447; c) Factor de carga = 0.6463; d) Factor de carga = 0.7323 – (Factor de escala de deformação igual a 1x).....	130
Figura 122 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1 – (Factor de escala de deformação igual a 1x).....	131
Figura 123 – Zona de concentração de tensões com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta (Factor de escala de deformação igual a 1x).....	131
Figura 124 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x).....	132
Figura 125 – Resultado da análise não linear com plasticidade – Variação do factor de carga proporcional LPF <i>versus</i> deslocamento.....	132
Figura 126 – Curva de comportamento do aço S275 J2H.....	133
Figura 127 – Provete utilizado no ensaio de tracção.....	133
Figura 128 – Resultados da análise não linear com plasticidade: a) Factor de carga = 0; b) Factor de carga = 0.479; c) Factor de carga = 0.789; d) Factor de carga = 0.940; e) Factor de carga = 1.025 – (Factor de escala de deformação igual a 1x).....	134

Figura 129 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1 – (Factor de escala de deformação igual a 1x)	135
Figura 130 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x)	135
Figura 131 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 10x)	136
Figura 132 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x)	137
Figura 133 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295 – (Factor de escala de deformação igual a 2x).....	137
Figura 134 – Resultado da análise não linear com plasticidade – Variação do factor de carga proporcional (LPF) versus deslocamento segundo o eixo z-z de um ponto pertencente ao tubo secundário.....	138

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Sinistralidade Geral em Portugal de 1989 a 2008 [1]	3
Tabela 2 – Relação dos acidentes envolvendo vítimas em veículos pesados de passageiros (2004-2008) [1]	4
Tabela 3 – Modos de rotura para juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS, com aplicação de esforços normais e momento flector [10]	36
Tabela 4 – Critérios de dimensionamento para junta em cotovelo soldada em elementos RHS [10]	38
Tabela 5 – Valores de cálculo da resistência de junta soldada reforçada em K, entre elementos diagonais RHS e corda RHS [10]	40
Tabela 6 – Expressões para o cálculo de momentos flectores actuantes numa junta em T [10]	42
Tabela 7 – Parâmetros da ligação – Caso 1	43
Tabela 8 – Valores de cálculo do esforço normal resistente para os tubos secundários 1 e 2 da junta de ligação K [10]	45
Tabela 9 – Expressões para determinação de características geométricas da junta de ligação K [10]	45
Tabela 10 – Cálculo dos esforços normais resistentes dos tubos secundários 1 e 2 para os diferentes modos de rotura	47
Tabela 11 – Reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para junta de ligação K [10]	48
Tabela 12 – Parâmetros geométricos do reforço – Caso 2	48
Tabela 13 – Parâmetros da junta em cotovelo soldada	49
Tabela 14 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×3 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento	56
Tabela 15 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×3 [mm] com um elemento na espessura, ao nível da tensão de von Mises	57
Tabela 16 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×6 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento	58

Tabela 17 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×6 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível da tensão de von Mises	59
Tabela 18 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×8 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento	60
Tabela 19 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×8 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível da tensão de von Mises	61
Tabela 20 – Parâmetros gerais para o Caso 1 – Situação de Tubos de larguras iguais.....	86
Tabela 21 – Resultados obtidos para o modelo original – Tubos de larguras diferentes.....	95
Tabela 22 – Resultados obtidos para a solução de colocação de reforço em forma de cunha – Tubos de larguras diferentes.....	95
Tabela 23 – Resultados obtidos para a solução de colocação de reforço com raio concordante – Tubos de larguras diferentes.....	96
Tabela 24 – Resultados obtidos para o modelo original – Tubos de larguras iguais.....	97
Tabela 25 – Resultados obtidos com aplicação de reforços – Tubos de larguras iguais.....	97
Tabela 26 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 2 (Modos de rotura) – sem reforço aplicado	115
Tabela 27 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 2 (Modos de rotura) – com reforço aplicado	116
Tabela 28 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 3 – Ligação em cotovelo soldada.....	126

Acrónimos e Caracteres

Acrónimos

- ANSR – Associação Nacional de Segurança Rodoviária
- CE – Comunidade Europeia
- EC3 – Regulamento Eurocódigo 3
- ECBOS – Enhanced Coach and Bus Occupant Safety
- IMTT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, I.P.
- MEF – Método de Elementos Finitos
- UNECE – United Nations Economic Commission for Europe

Caracteres Romanos

A_v – Área de corte da corda

b_0 – Largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 0 tipo RHS

b_1 – Largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 1 tipo RHS

b_2 – Largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 2 tipo RHS

$b_{e,p}$ – Largura efectiva para resistência ao punçoamento

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

Classe II – veículos construídos principalmente para o transporte de passageiros sentados, concebidos de modo a poderem transportar mais passageiros de pé no corredor e ou numa zona cuja área não exceda o espaço correspondente a dois bancos duplos

Classe III – veículos construídos exclusivamente para o transporte de passageiros sentados

Classe B – veículos não concebidos para o transporte de passageiros de pé

E – Módulo de elasticidade do material constitutivo

f_{y0} – Tensão de cedência do material constitutivo do elemento 0

f_{y1} – Tensão de cedência do material constitutivo do elemento 1

f_{y2} – Tensão de cedência do material constitutivo do elemento 2

g - Afastamento entre elementos diagonais de uma junta

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

h_1 – Altura total no plano da secção transversal do elemento 1

h_2 – Altura total no plano da secção transversal do elemento 2

h_2 – Posição final do veículo no ensaio de capotamento (contacto com o solo)

i – inteiro utilizado como índice para designar um elemento de uma junta ($i = 0$, designa uma corda, ($i = 1, 2$ ou 3) os elementos secundários)

M2 – Veículos concebidos e construídos para o transporte de passageiros, com mais de oito lugares sentados além do lugar do condutor e uma massa não superior a 5 t

M3 – Veículos concebidos e construídos para o transporte de passageiros, com mais de oito lugares sentados além do lugar do condutor e uma massa superior a 5 t

Máx. – Valor Máximo

m – Metro

mm – Milímetros

M_{ed} – Momento flector actuante

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

$M_{pl,rd}$ – Momento flector plástico resistente

n – Relação entre $(\sigma_{0,Ed} / f_{y0}) / \gamma_{M5}$ [1]

N – Newton

N_{ed} – Esforço normal actuante

$N_{pl,rd}$ – Esforço normal plástico resistente

N_{rd} – Esforço normal resistente

$N_{1,rd}$ – Esforço normal resistente no elemento 1

$N_{2,rd}$ – Esforço normal resistente no elemento 2

P_1 – Pressão aplicada no elemento 1

P_2 – Pressão aplicada no elemento 2

Pa – Pascal

RHS – Perfil tubular rectangular (do inglês *Rectangular Hollow Section*)

t_0 – Espessura da parede do elemento 0

t_1 – Espessura da parede do elemento 1

t_2 – Espessura da parede do elemento 2

VLCP – Plano longitudinal vertical médio

Caracteres Gregos

$\sigma_{0,Ed}$ – Tensão de compressão máxima a que está sujeita a corda na secção da junta

β – Relação entre a largura dos elementos diagonais e da corda

γ_{M5} – Coeficiente parcial de segurança para as ligações

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

Δh – movimento vertical do centro de gravidade da secção da carroçaria

σ – Tensão

ε – Deformação

1. Introdução

1.1. Motivação e contexto do trabalho desenvolvido

Durante os últimos anos e com o aumento da taxa de acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros, os mesmos causaram trágicas consequências para os seus ocupantes, mostrando-se assim a importância da segurança passiva. Actualmente, nos países pertencentes à União Europeia, a certificação da resistência da superestrutura em caso de capotamento é obrigatória para a obtenção da homologação de um veículo pesado de passageiros, sendo esta certificação feita de acordo com o regulamento *UNECE R66*. Além da questão a nível da segurança passiva, os veículos pesados de passageiros devem seguir a tendência de utilizar materiais cada vez mais leves, de modo a se reduzirem as emissões de CO₂ sem diminuição da resistência da estrutura, sendo este um factor essencial para as exportações deste tipo de veículos.

Esta Dissertação centra-se no estudo de ligações entre tubos usados na construção deste tipo de veículos. Estas foram estudadas quando sujeitas a solicitações extremas, através de expressões de cálculo preconizadas no regulamento Eurocódigo 3, que nos indica que cargas se coloca para se atingirem estados limites últimos.

1.2. Estudo estatístico de acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros em Portugal

Os acidentes que se verificam no sector dos transportes, quer terrestre, marítimo ou aéreo, acarretam graves consequências para os ocupantes e custos significativos para os intervenientes e empresas, levando com isto a uma flutuação na economia dos países. Segundo elementos estatísticos sabe-se que o transporte aéreo é o que verifica um maior nível de segurança, ao contrário do que acontece no sector rodoviário, onde se verifica maior nível de insegurança, o que leva a uma maior taxa de acidentes e número de vítimas.

Este facto constitui uma motivação extra para a realização deste estudo, uma vez que serão analisadas ligações tubulares e nós de ligação usadas na construção de veículos pesados de passageiros.

Capítulo 1 – Introdução

Na tabela e figura seguintes são apresentados dados relativos à sinistralidade ocorridos em Portugal, no período de 1989 a 2008.

Tabela 1 – Sinistralidade Geral em Portugal de 1989 a 2008 [1]

Sinistralidade em Portugal				
Ano	Acid, c/ vítimas	Mortos	F. Graves	F. Ligeiros
1989	43499	2375	12414	49105
1990	45110	2321	12165	51164
1991	48953	2475	12548	56987
1992	50851	2372	12475	58511
1993	48645	2077	11830	54880
1994	45830	1926	10387	51776
1995	48339	2085	11229	54598
1996	49265	2100	10842	55785
1997	49417	1939	9335	57181
1998	49319	1865	8177	58426
1999	47966	1750	7697	57630
2000	44159	1629	6918	53006
2001	42521	1466	5797	51247
2002	42219	1469	4770	51815
2003	41495	1356	4659	50599
2004	38930	1135	4190	47819
2005	37066	1094	3762	45487
2006	35680	850	3483	42654
2007	35311	854	3116	43202
2008	33613	776	2606	41327

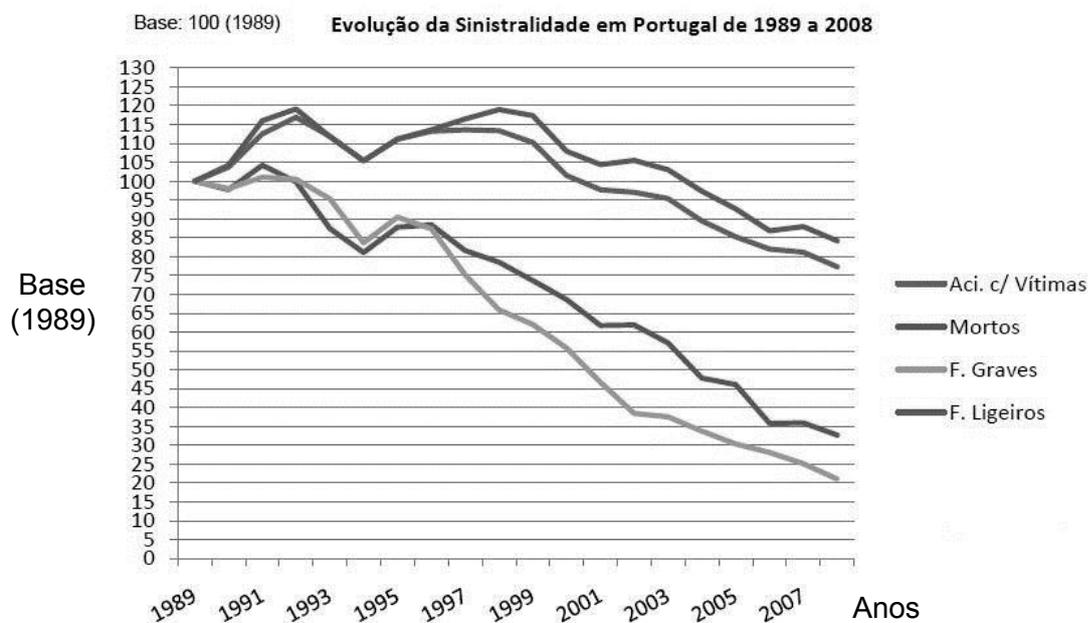


Figura 1 – Evolução da Sinistralidade em Portugal de 1989 a 2008 [1]

Capítulo 1 – Introdução

Pela análise destes dados verifica-se haver um decréscimo em número de vítimas ao longo dos últimos anos, devido a medidas ao nível da segurança rodoviária que foram implementadas.

Relativamente à evolução de acidentes com veículos pesados de passageiros, verifica-se que o número de acidentes diminui ao longo dos anos; no entanto estes valores ainda são elevados.

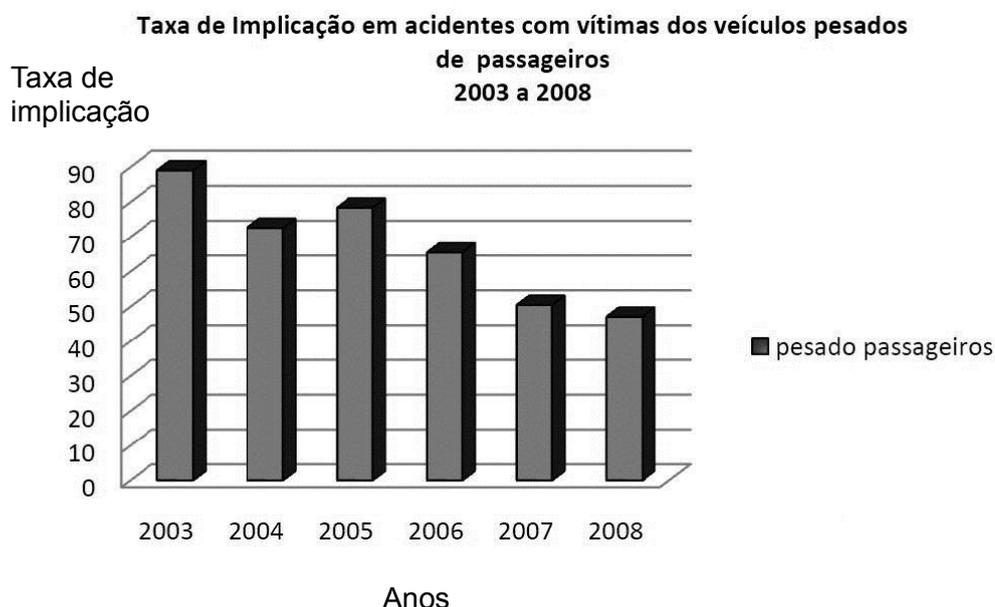


Figura 2 – Taxa de implicação de veículos pesados de passageiros (2003-2008), sendo a taxa de implicação definida entre o número de veículos envolvidos em acidentes com vítimas e o número total de veículos ($\times 1000$) [1]

Na tabela seguinte apresentam-se dados relativos a acidentes envolvendo vítimas ocorridos com veículos pesados de passageiros, durante o período de 2004 a 2008.

Tabela 2 – Relação dos acidentes envolvendo vítimas em veículos pesados de passageiros (2004-2008) [1]

	Veículos pesados em Portugal de 2004 a 2008				
	Pesados de passageiros				
	2004	2005	2006	2007	2008
Nº de veículos seguros	9074	8772	9197	12038	12994
Acidentes com vítimas	643	670	588	603	599
Vítimas mortais	36	20	11	29	18
Feridos graves	78	81	76	66	31

Capítulo 1 – Introdução

Através da análise dos resultados anteriores, verifica-se que ainda existe um número considerável de vítimas mortais e de feridos com gravidade com os acidentes envolvendo os veículos pesados de passageiros, apesar da sua diminuição ao longo dos anos.

De acordo com o manual consultado [1], o mesmo faz o seguinte comentário que a seguir se transcreve:

“verificou-se que, no período de 2004 a 2008, os acidentes envolvendo os veículos pesados de passageiros ocorreram maioritariamente dentro das localidades, ainda de forma mais acentuada do que a sinistralidade em geral, e ao contrário do que sucede com os pesados de mercadorias, onde a maioria dos acidentes se verifica fora das localidades.

Salienta-se igualmente que a gravidade dos acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros, dentro e mais acentuadamente fora das localidades, foi superior à gravidade dos acidentes em geral.

Na realidade, embora fora das localidades tenham ocorrido apenas 14.8% dos acidentes que envolveram pesados de passageiros, destes resultaram 25.9% dos feridos graves e 46.5% das vítimas mortais em acidentes com estes veículos.

A gravidade dos acidentes está associada à velocidade de impacto dos veículos, sendo essa a razão pela qual o índice de gravidade é superior fora das localidades (5 vezes mais mortos por acidente com pesados de passageiros verificados fora das localidades relativamente aos verificados dentro das localidades” [1].

Capítulo 1 – Introdução

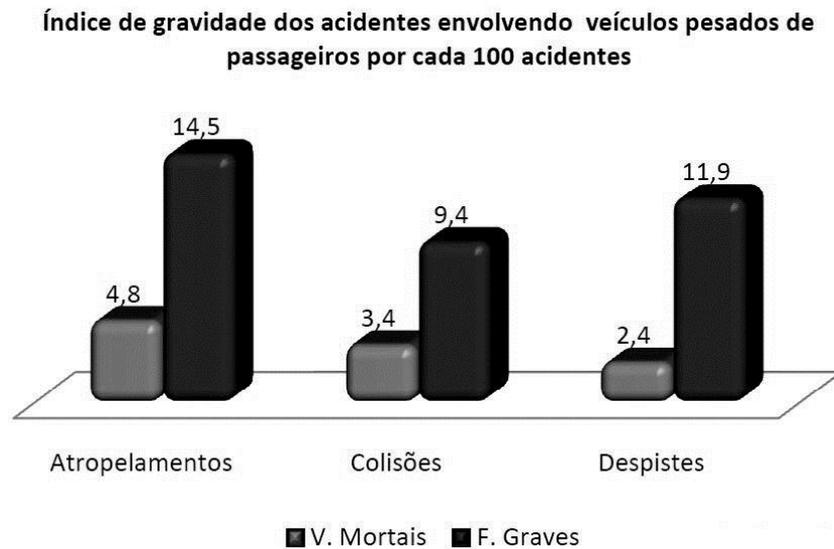


Figura 3 – Índice de gravidade dos acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros [1]

Da figura anterior pode-se concluir que o índice de gravidade (número de vítimas mortais por 100 acidentes envolvendo vítimas) relacionado com os despistes é elevado, o que indica que os capotamentos com veículos pesados de passageiros envolvem um número considerável de vítimas mortais e feridos graves, sendo por isso uma motivação extra para o estudo das ligações existentes na estrutura destes veículos.

Em seguida, mostram-se algumas imagens de um capotamento que ocorreu com um veículo pesado de passageiros, na zona de Coimbra, no ano de 2011, tendo provocado uma vítima mortal e 32 feridos.



a)



b)

Figura 4 – a) e b) Imagens de um acidente envolvendo um veículo pesado de passageiros

Da análise das imagens anteriores verifica-se que houve uma cedência da superestrutura, o que provocou a invasão do espaço residual do veículo em zonas de nós de ligação. Verifica-se que a ligação dos pilares numa lateral do veículo cedeu, o que levou a que se iniciasse o processo de colapso da superestrutura (através da formação de rótulas plásticas localizadas com plastificação de material).

1.3. Objectivos deste estudo

Nesta Dissertação, irão ser analisadas ligações entre tubos de secção quadrangular de acordo com o Eurocódigo 3 e propostas soluções de melhoria construtiva, no sentido 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. Foi dada especial atenção aos pontos críticos da ligação, ou seja, pontos com valores de tensão instalada muito elevados, sendo que com isso se procuraram soluções para otimizar a distribuição de tensões e diminuir a tensão instalada nesses pontos, tendo-se para isso testado alguns reforços por forma a melhorar o desempenho das ligações e aumentar a sua capacidade resistente.

1.4. Importância do estudo dos nós de ligação na superestrutura de veículos pesados de passageiros

Pelas razões referidas no ponto anterior, o estudo dos nós de ligação de uma estrutura pertencente a veículos pesados de passageiros é de extrema importância. Nesta estrutura podem-se encontrar diversas ligações entre perfis tubulares, nomeadamente na ligação entre montantes e a superestrutura e na zona de ligação aos pilares e arco de segurança. As ligações devem ser estudadas para solicitações que envolvam a integridade da própria estrutura, bem como a dos seus ocupantes. Os nós de ligação devem ser capazes de absorver muita energia por deformação plástica, como por exemplo na situação de capotamento.

Em muitos casos, verifica-se que, durante a construção deste tipo de veículos em determinados pontos da estrutura as ligações existentes não são as mais favoráveis, como se demonstra nas figuras seguintes. Estas imagens foram obtidas após um ensaio de capotamento de uma secção de um veículo pesado de passageiros, onde se mostra que as mesmas foram sujeitas a elevadas deformações.

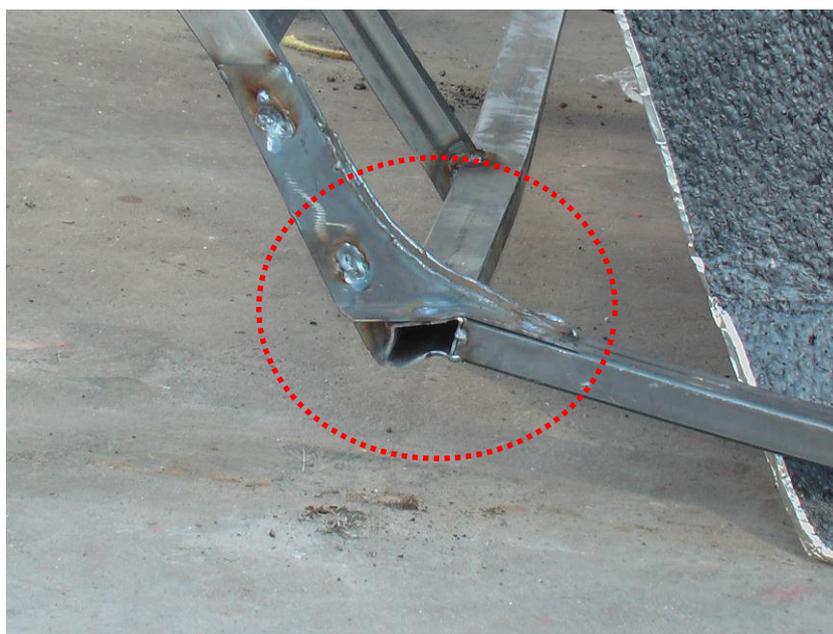


Figura 5 – Nó de ligação após ensaio de capotamento

Verifica-se na figura anterior que o nó de ligação pertencente a uma ligação entre o pilar e o tejadilho sofreu uma elevada deformação, originada pelas elevadas tensões localizadas. Sendo o arco de segurança uma das estruturas mais importantes dos

Capítulo 1 – Introdução

veículos pesados de passageiros, a mesma deve ser dimensionada de acordo com solicitações externas impostas (por exemplo, na actuação de uma força compressiva de contacto).

O principal objectivo do projecto de um veículo pesado de passageiros em caso de choque (impacto lateral/frontal ou capotamento) passa por converter o mais rapidamente possível a energia cinética noutras formas de energia (energia de deformação plástica, atrito, etc.), para serem absorvidas pela estrutura por forma a reduzir os efeitos de variações rápidas de velocidade (acelerações e desacelerações repentinas) nos passageiros, e, igualmente na própria estrutura. Para se proteger um passageiro em caso de acidente, a estrutura de um veículo deve ser capaz de executar duas funções; a primeira de manter a integridade estrutural (espaço residual) e garantir a não invasão do mesmo e a segunda limitar a força transmitida aos passageiros a valores toleráveis.

O espaço residual; como se verá mais à frente, não pode ser invadido durante um ensaio de capotamento; por essa razão, as ligações subjacentes a esta estrutura deverão ser estudadas de modo a que, neste ensaio; toda a energia cinética seja convertida em energia de deformação plástica. Desta forma, os elementos e ligações de uma superestrutura de veículos pesados de passageiros devem ser suficientemente resistentes para que cumpram com as normas e directivas vigentes na União Europeia, tal como o Regulamento *UNECE R66*.

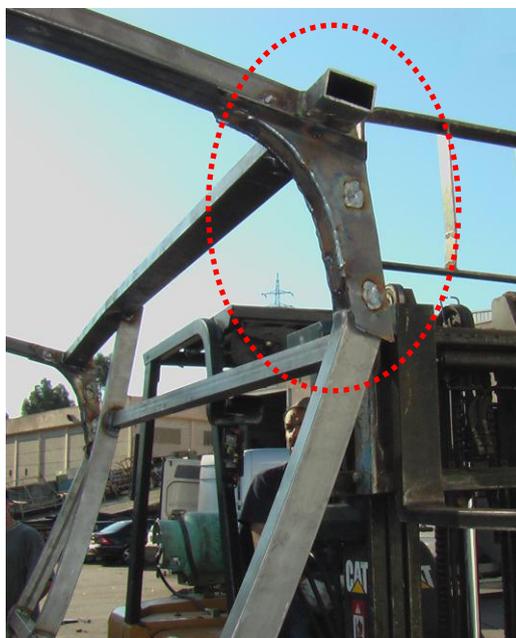


Figura 6 – Pormenor de um nó de ligação existente num arco de segurança

2. Estado da Arte

2.1. Caracterização de elementos estruturais de veículos pesados de passageiros

Neste ponto, ir-se-á abordar quais os elementos estruturais constituintes dos veículos pesados de passageiros. O processo de montagem de um veículo pesado de passageiros inicia-se com a preparação do *chassi*, paralelamente a esta operação a superestrutura é montada. Os veículos pesados de passageiros são fabricados por duas entidades distintas, que são o fabricante do *chassi* e o transformador ou carroçador.

2.1.1. *Chassi* de um veículo pesado de passageiros

O *chassi* de um veículo pesado de passageiros é sempre fornecido com um manual, designado por “*Manual do Carroçador*”, onde este indica que intervenções poderão ser realizadas num *chassi*. Este manual indica algumas regras que devem ser seguidas para a sua construção; no caso de as premissas indicadas pelo fabricante do *chassi* não serem seguidas, este poderá levar à perda da garantia do mesmo. O *chassi* mais utilizado na construção de veículos pesados de passageiros é em forma de longarinas.



Figura 7 – *Chassi* de veículo pesado de passageiros (M3)

O projecto de um *chassi* para um veículo pesado de passageiros tem como principais objectivos: cumprir os regulamentos nacionais e internacionais e cumprir com as exigências de segurança requeridas neste tipo de estruturas. As principais funções estruturais de um *chassi* são: suportar os esforços aplicados quanto à rigidez torsional e flexão, em que este seja capaz de suportar todos os elementos constituintes de um veículo pesado de passageiros, tais como: caixa de velocidades, motor, suspensões, tanque de combustível, a própria estrutura da carroçaria, bagagens e passageiros.

Relativamente ao modo como as ligações tubulares poderão ser ligadas à carroçaria, os fabricantes disponibilizam manuais (por exemplo, o *manual do carroçador ATEGO* [2]), os quais abordam a forma de se fazer a ligação do *chassi* à carroçaria.

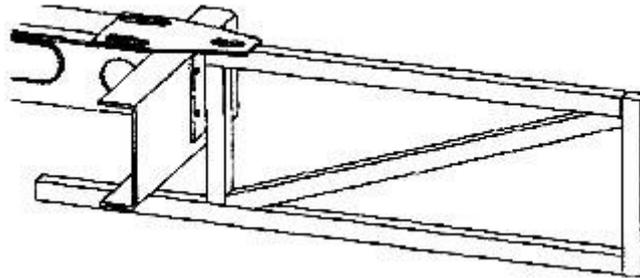


Figura 8 - Exemplo de ligação entre o *chassi* e a carroçaria

2.1.2. Superestrutura de um veículo pesado de passageiros

Os construtores e instaladores das superestruturas, sejam carroçarias ou mecanismos operacionais, bem como os que realizam modificações estruturais no veículo, têm como obrigação conhecerem e obedecerem a todo o enquadramento legal e legislação dos órgãos competentes relativos aos trabalhos por eles executados. A superestrutura deve ter uma boa capacidade resistente no ensaio de capotamento, de maneira a que o espaço residual não seja invadido.

No projecto de uma superestrutura deve-se ter em conta o peso da estrutura metálica de modo a que o peso final do veículo cumpra com determinadas limitações (os *chassis* estão limitados a um peso máximo - peso bruto). Com a diminuição do peso bruto dos veículos pesados de passageiros, consegue-se menores emissões de CO₂ e poder-se transportar mais passageiros.

A superestrutura é constituída por 3 elementos, que se designam por arco de segurança, treliças laterais/frontais e montantes, em que estes são construídos através de construção metálica soldada por meio de treliça. O material corrente para este tipo de construção é o aço.

Na construção deste tipo de veículos, os construtores optam pelo uso de tubos de secção quadrada devido a resultarem superfícies planas onde é mais fácil fixar os revestimentos e por produzirem ligações entre tubos mais simples, no corte e no posicionamento para soldadura. Com esta solução permite que cada painel seja fabricado independentemente

Capítulo 2 – Estado da Arte

em *gabarits*, apresentando assim as vantagens inerentes: melhor toleranciamento geométrico e dimensional e um fabrico mais rápido a menor custo [3].

Na superestrutura de um veículo pesado de passageiros pode-se encontrar diversas ligações tubulares entre as partes constituintes da mesma. No âmbito desta Dissertação, foram dimensionadas e modeladas algumas ligações existentes neste tipo de veículos e foram retiradas conclusões relativamente às mesmas, tendo como base o Eurocódigo 3. Para se compreender melhor onde estas ligações se localizam (ligação em T, em K e junta em cotovelo soldada), as mesmas representam-se nas figuras seguintes num modelo de duas secções de um veículo pesado de passageiros. Este modelo possui três arcos de segurança, em que foi utilizado num ensaio para a homologação desta série.

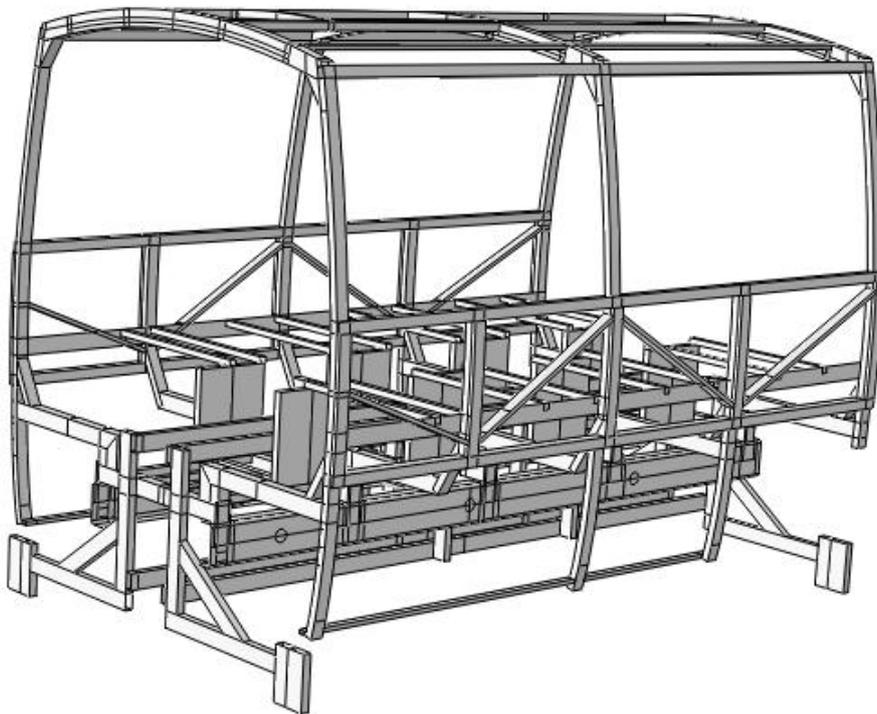


Figura 9 – Secções de um modelo de veículo pesado de passageiros [4]

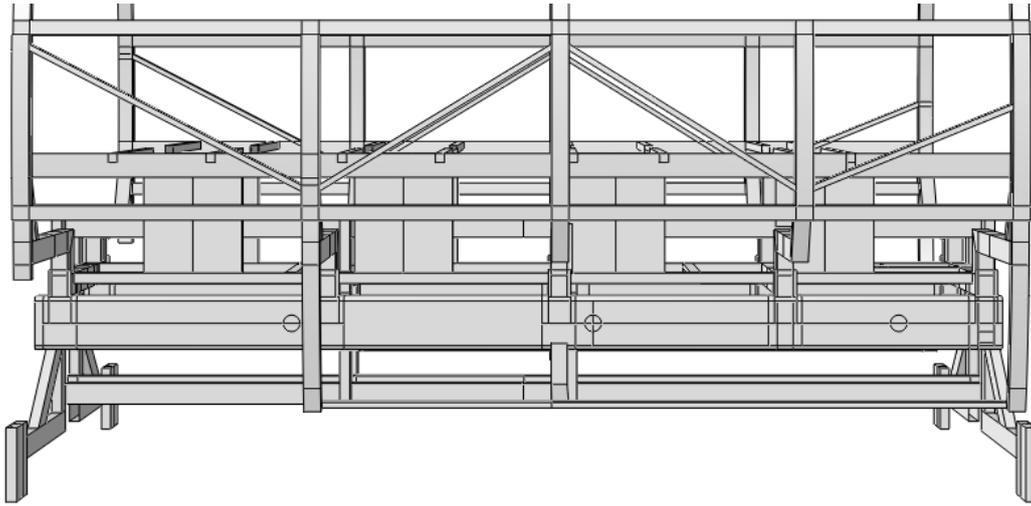


Figura 10 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de ligações existentes na Treliça Lateral

[4]

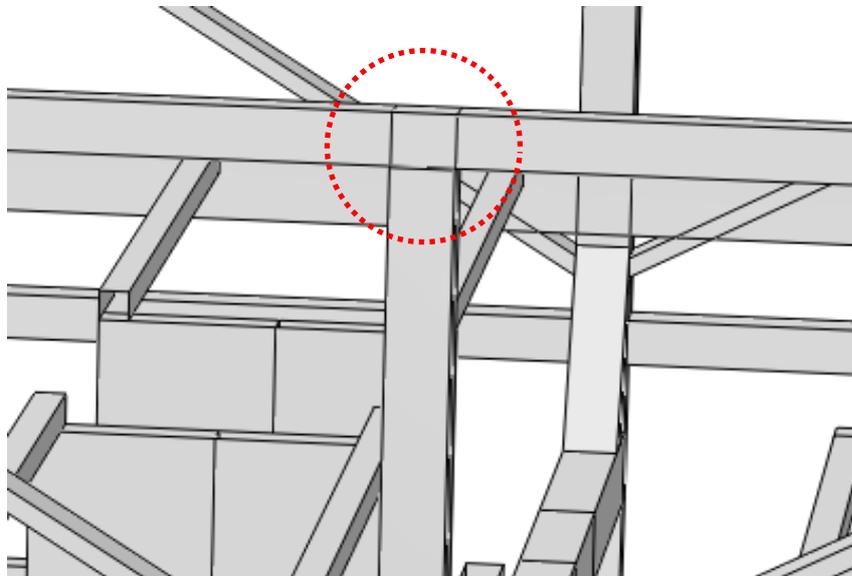


Figura 11 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em T [4]

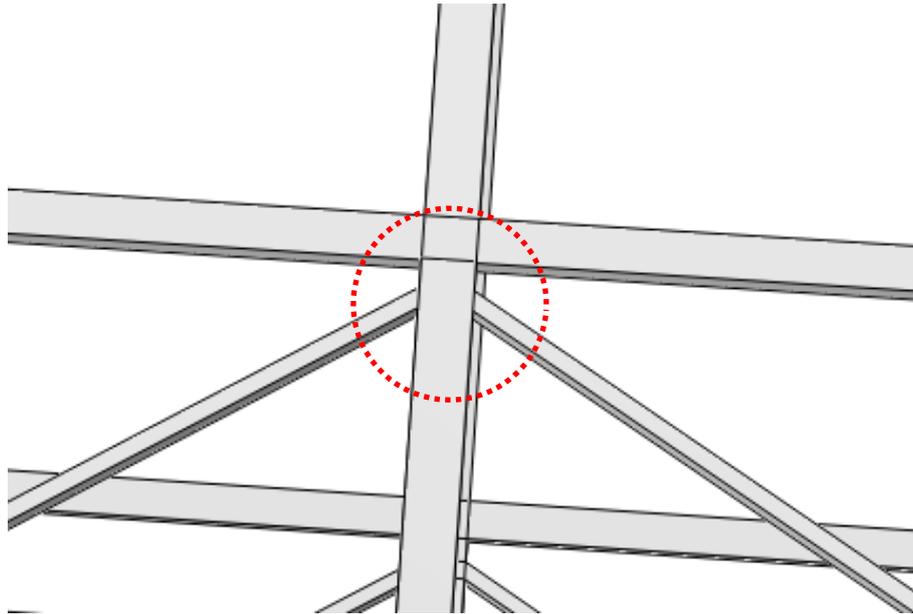


Figura 12 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em K [4]

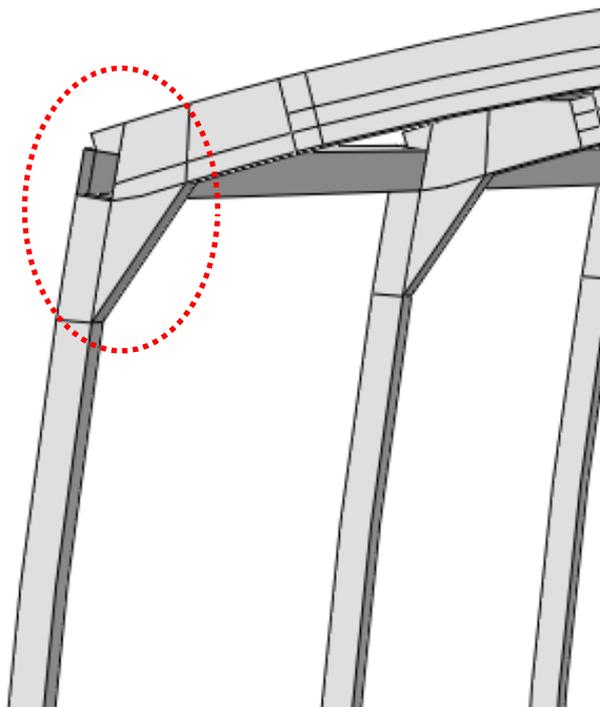


Figura 13 – Pormenor da superestrutura – Exemplo de uma ligação em junta de cotovelo soldada [4]

2.2. Estudos desenvolvidos para acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros (Projecto ECBOS)

Sendo a temática de acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros muito relevante irão ser abordados neste capítulo alguns projectos europeus que foram desenvolvidos para o estudo de acidentes com este tipo de veículos, nomeadamente no estudo das ligações e situações de acidente envolvendo a estrutura e os próprios ocupantes. Neste capítulo, ir-se-á abordar alguns elementos que constituem a estrutura de um veículo pesado de passageiros e caracterizar os regulamentos actualmente aplicáveis para a homologação deste tipo de veículos.

Para o desenvolvimento destes estudos, diversos institutos de investigação europeus e universidades, entre eles o *Cranfield Impact Centre (CIC)*, *Politecnico di Torino (POLITO)*, *TNO* e *Technical University Graz (TUG)*, abordaram os principais acidentes envolvendo veículos pesados de passageiros, propuseram novos métodos de ensaio com um custo efectivo e implementaram melhorias nos regulamentos por forma a se diminuir o risco de lesões nos ocupantes deste tipo de veículos [5].

Este projecto aborda a problemática dos danos causados nos passageiros durante o acidente por capotamento, sendo que no Regulamento *UNECE R66* esta problemática não é relevante, podendo assim ser uma melhoria eventualmente a ser realizada num futuro próximo e a promover nas próximas directivas com o intuito de se desenvolver veículos pesados de passageiros cada vez mais seguros.

Neste projecto, os principais temas de investigação baseiam-se essencialmente nos seguintes pontos: análise estatística de colisões, construção de uma base de dados com acidentes de autocarros, reconstrução de acidentes reais com auxílio de programas informáticos, modelos de simulação numérica para a estrutura do veículo e para os seus ocupantes e estudo da influência do número de ocupantes durante um acidente. Ir-se-á apresentar neste ponto da Dissertação alguns trabalhos que foram desenvolvidos no âmbito deste projecto, trabalhos esses que visam fundamentalmente a segurança dos passageiros durante a situação de capotamento de veículos pesados de passageiros, entre outros acidentes.

2.2.1. Modelos de Simulação Numérica para estruturas de veículos

O *CIC* e *TNO Automotive* geraram um modelo numérico para o impacto frontal, enquanto que o *Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA)* e o *POLITO* criaram um modelo para o estudo do capotamento.

Para o estudo do impacto frontal, desenvolveu-se um detalhado modelo em elementos finitos de um veículo de pesado de passageiros, do tipo M2.

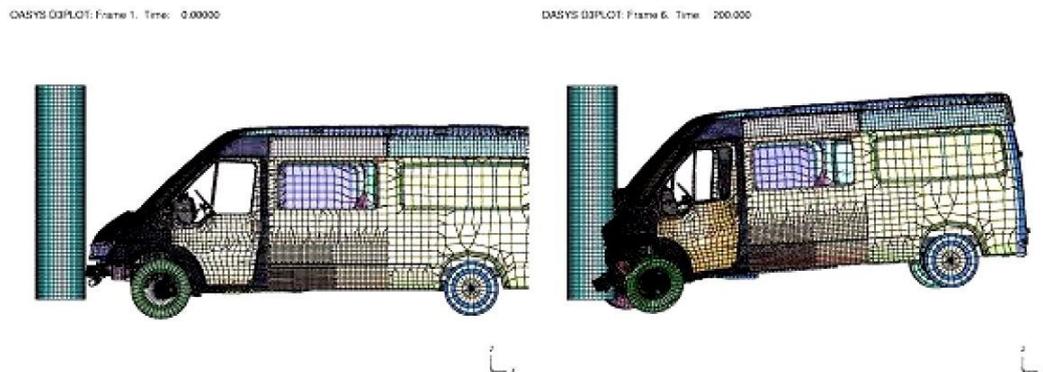


Figura 14 - Simulação de um modelo para o estudo do impacto frontal, desenvolvido pelo *CIC* e *TNO Automotive* [5]

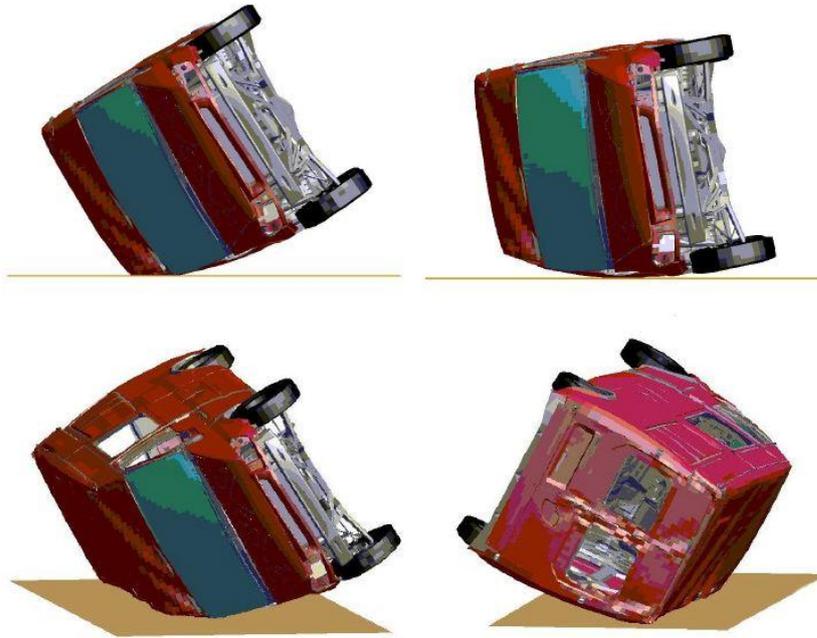


Figura 15 - Simulação de um modelo para o estudo do capotamento, desenvolvido pelo *INSIA* e *POLITO* [5]

Os modelos numéricos criados pelo *INSIA* foram construídos com base numa determinada secção de um veículo pesado de passageiros. Após os modelos terem sido validados foi possível fazer uma extrapolação para representar o comportamento de um veículo na sua globalidade quando sujeito a uma situação de capotamento. Um modelo de uma secção foi desenvolvido recorrendo ao *software ANSYS®* utilizando a integração explícita no tempo.

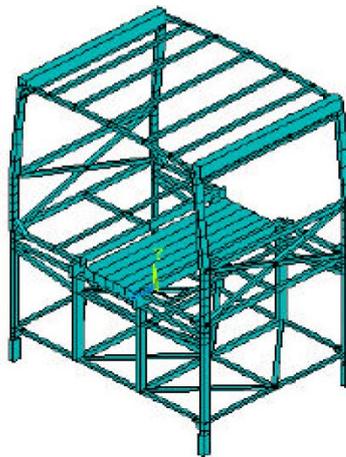


Figura 16 – Modelo para a simulação numérica de uma secção, desenvolvido pelo *INSIA* [5]

Foi simulado igualmente um modelo numérico de uma determinada secção, em que foi utilizado o código comercial de elementos finitos *PAMCRASH*[®], que utilizou elementos finitos do tipo viga com integração explícita no tempo.

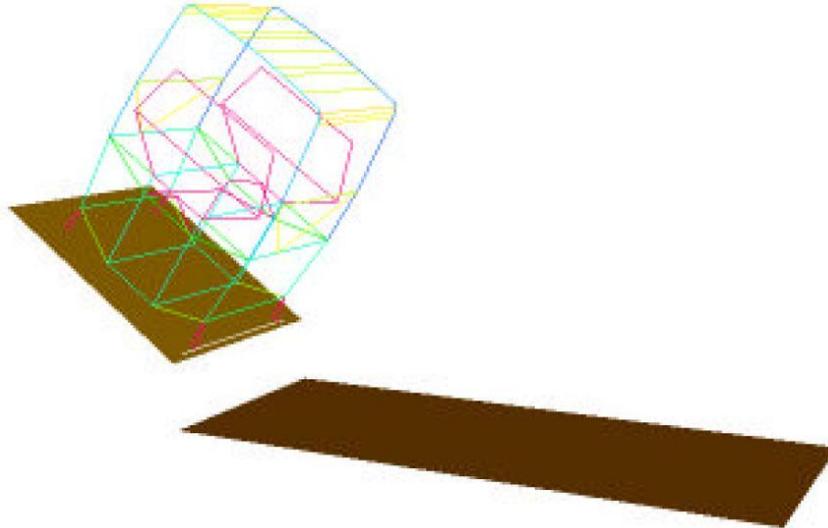


Figura 17 - Simulação do ensaio de capotamento, recorrendo ao *software* de simulação *PAMCRASH*[®], desenvolvido pelo *INSIA* [5]

2.2.2. Modelos de simulação numérica em caso de acidente

Foram desenvolvidos modelos numéricos para o interior de um veículo pesado de passageiros com a introdução de ocupantes, assentos e sistema de restrição (cinto de segurança) para três tipos específicos de veículos (veículo M3 para *TNO*, veículo M2 para *Cranfield Impact Centre* e veículo de passageiros citadino para *TUG*).

O *INSIA* criou dois modelos numéricos, em que num modelo foi criada uma determinada secção com ocupantes e no outro modelo não foram colocados ocupantes. Para o caso da utilização de uma secção com ocupantes, testou-se o uso de sistema de restrição (cintos de segurança) em dois pontos e estudou-se como é que a posição original de cada ocupante afecta a severidade e o tipo de lesão sofrida durante o capotamento, tendo por base o regulamento *UNECE R66*.

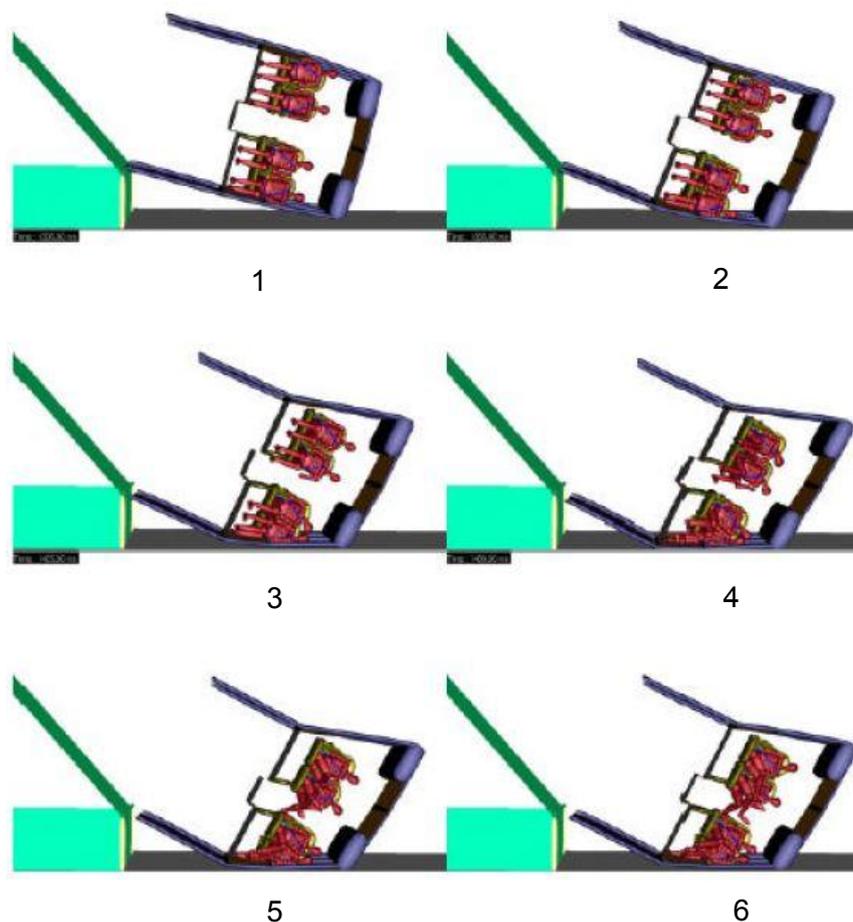


Figura 18 – 1), 2), 3), 4), 5) e 6) Simulação da superestrutura com ocupantes (usando sistema de restrição), de acordo o regulamento *UNECE R66*, desenvolvido pelo *INSIA* [5]

2.2.3. Investigação através de métodos numéricos matemáticos

No *CIC* foi desenvolvido um estudo para se testar a resistência da superestrutura de um típico veículo pesado de passageiros na situação de capotamento, tendo-se para isso utilizado um modelo em Elementos Finitos através de elementos de viga tridimensionais não lineares para um estudo paramétrico e para modelar determinados detalhes utilizados na montagem do modelo. Testaram-se vários modelos de elementos finitos na tentativa de se obterem informações teóricas quanto ao comportamento estrutural à flexão em componentes e ligações deste tipo de veículos.

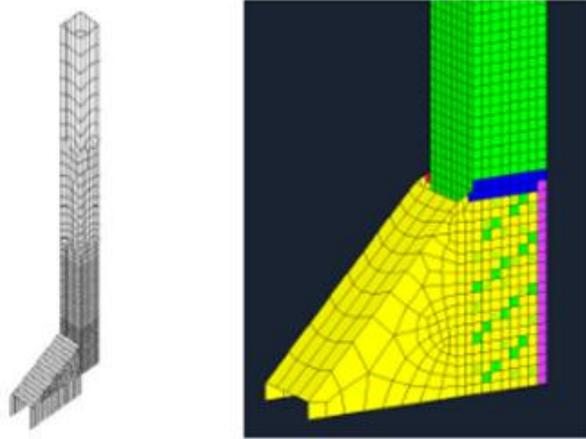


Figura 19 - Estudos estruturais em ligações, desenvolvido pelo CIC [5]

No trabalho pelo *INSIA* foram desenvolvidos métodos numéricos para o estudo do capotamento de veículos pesados de passageiros. O efeito dos cintos de segurança nos ocupantes (sistemas de restrição) sobre a deformação estrutural e na absorção de energia foi quantificada e introduzida nos modelos numéricos criados.

2.3. Regulamento *UNECE R66* – Homologação de veículos pesados de passageiros quanto à resistência da superestrutura

2.3.1. Definição e campo de aplicação

O Regulamento *UNECE R66* estabelece algumas prescrições técnicas para a homologação da resistência da superestrutura em veículos pesados de passageiros, sendo esta feita através de um ensaio de capotamento. Segundo este, “*O presente regulamento aplica-se a veículos rígidos ou articulados de um só piso projectados e construídos para o transporte de mais de 22 passageiros, sentados ou em pé, para além do condutor e da tripulação*” [6]. No entanto, uma segunda emenda foi imposta a este regulamento, e entrou em vigor no dia 19 de Agosto de 2010, sendo actualmente aplicável a todos os veículos rígidos ou articulados que pertençam às categorias M2 e M3, Classe II ou III, ou classe B e que tenham mais de 16 passageiros, ou seja, a emenda vem alargar a homologação a uma maior gama de veículos pesados de passageiros, devendo para isso as empresas construtoras deste tipo de veículos ter a esta homologação presente. O regulamento *UNECE R66* define no seu âmbito certos parâmetros que devem ser respeitados durante os ensaios, quer de homologação base ou

equivalente, assim sendo: especificação do espaço residual e a determinação da posição do centro de gravidade do veículo a ser ensaiado.

2.3.2. Espaço residual

Segundo o Regulamento *UNECE R66*, o espaço residual é definido como sendo "um espaço a preservar no (s) compartimento (s) para os passageiros, a tripulação, e o condutor para aumentar a possibilidade de sobrevivência dos passageiros, do condutor e da tripulação em caso de capotamento" [6]. Ou seja, durante e após o ensaio de capotamento, a superestrutura deve ser capaz de garantir que o espaço residual não é invadido. Para a homologação de veículos pesados de passageiros ser concedida esta premissa deverá ser cumprida. A seguir, apresenta-se a especificação do espaço residual.

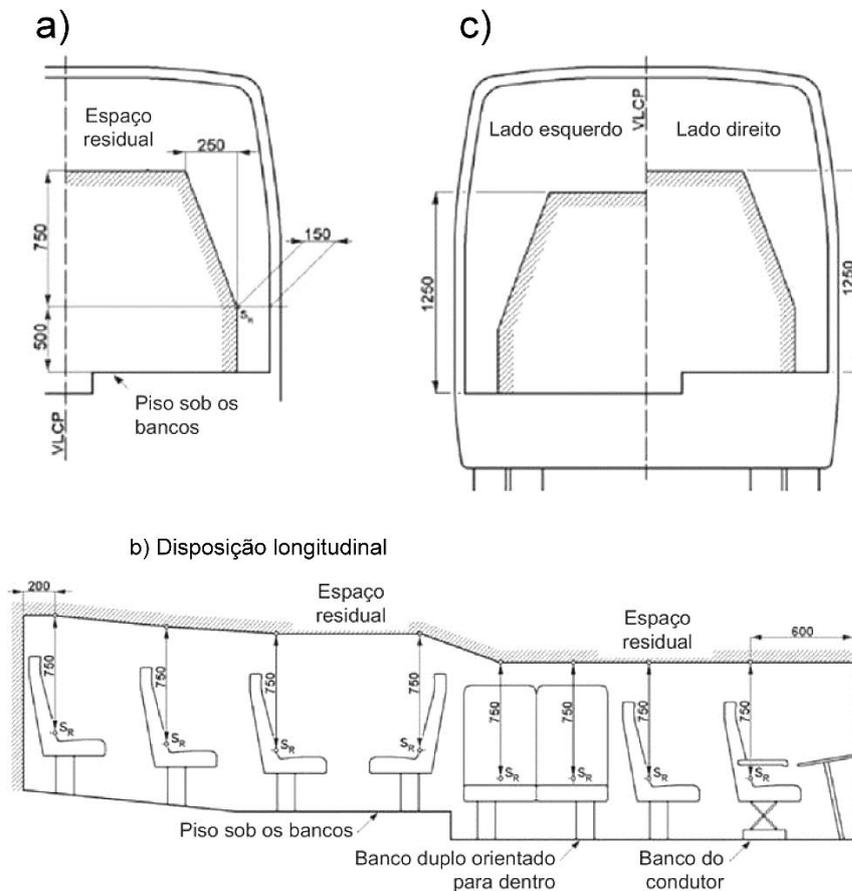


Figura 20 - Especificação de Espaço residual, a) e c) Disposição lateral [6]

2.3.3. Definição da superestrutura

Uma superestrutura de um veículo pesado de passageiros deve albergar todos os componentes da carroçaria, na qual estes contribuem para a sua resistência. No ensaio de capotamento, esta deve ter uma boa capacidade de absorção de energia por deformação plástica, de modo a não ser invadido o espaço residual. Para o ensaio de capotamento deve-se definir a superestrutura da carroçaria e os segmentos que contribuem para a resistência e absorção de energia, os elementos de ligação entre os segmentos que contribuem para a resistência à torção da superestrutura e a distribuição de massa entre os segmentos da superestrutura.

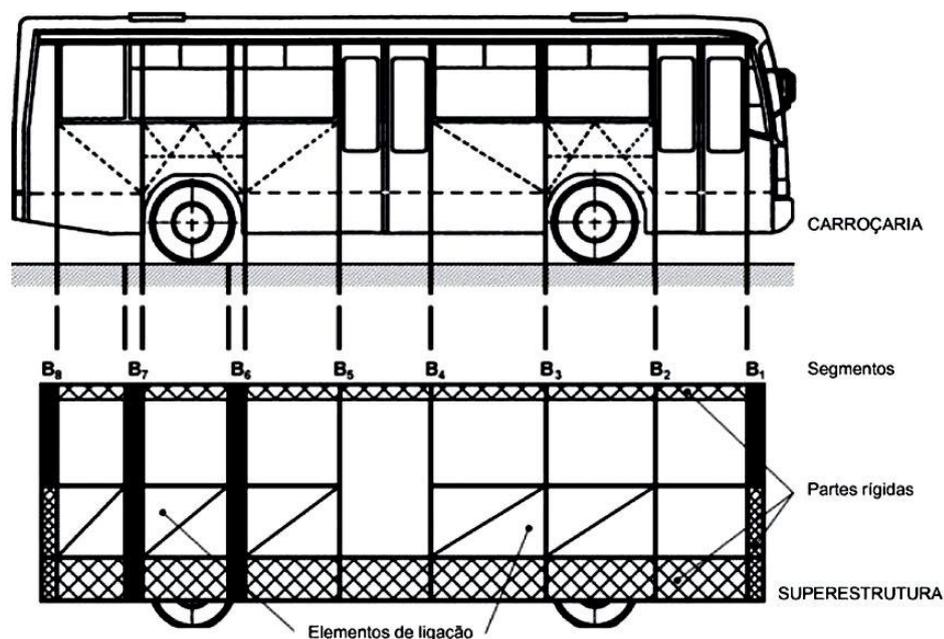


Figura 21 - Definição da superestrutura a partir da carroçaria [6]

2.3.4. Método de ensaio do regulamento

O método de ensaio para se aferir se uma determinada superestrutura de um veículo pesado de passageiros cumpre com o Regulamento anteriormente citado, passa por submeter essa mesma superestrutura ou parte dela a um ensaio com inclinação lateral (ensaio de capotamento), e verificar se o espaço residual não é invadido. O ensaio é efectuado do seguinte modo: “o veículo completo ou parte dele (secções de carroçaria) é colocado na plataforma basculante, com a suspensão bloqueada, e é inclinado lentamente até atingir uma posição de equilíbrio instável. O ensaio de capotamento tem início nessa posição instável do veículo, com uma velocidade angular nula, passando o

eixo de rotação pelos pontos de contacto das rodas com o solo. O veículo inclina-se até cair numa vala com uma profundidade nominal de 80 mm” [6].

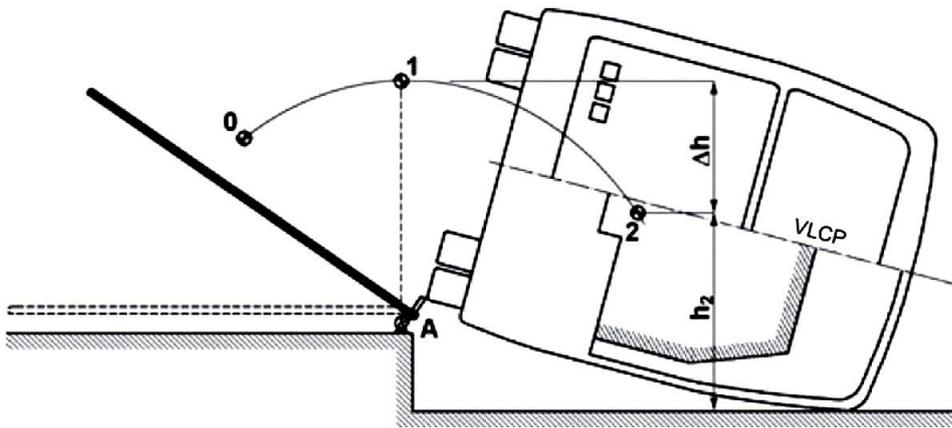


Figura 22 - Ensaio de capotamento [6]

Para que um determinado veículo pesado de passageiros cumpra com este Regulamento pode ser ensaiado através de vários ensaios que são equivalentes entre si e que o próprio Regulamento homologa.

O ensaio de capotamento com um veículo completo é de certa forma incomportável financeiramente devido a que o veículo é destruído na sua totalidade, sendo normalmente utilizado quando um ensaio de homologação equivalente não esteja a ser cumprido na íntegra.

2.3.5. Sugestões de aplicação em novos regulamentos

De acordo com o projecto *ECBOS*, foi elaborada uma lista de sugestões que poderão vir a ser aplicadas em futuros regulamentos e no próprio regulamento *UNECE R66*.

Recomendações a serem aplicadas no Regulamento *UNECE R66*:

- Recomendação e adaptação de sistemas de restrição (cintos de segurança);
- A massa dos ocupantes (com uso de cinto de segurança) deve ser considerada para o cálculo e teste;
- Os veículos do tipo M2 devem ser incluídos.

Recomendações a serem aplicadas nos novos Regulamentos:

- Resistência da superestrutura em veículos pesados de passageiros de 2 pisos;
- Harmonizar a base de dados sobre acidentes (impacto lateral/frontal e capotamento);
- A carga de contacto na lateral (estrutura/vidro) deve ser a mais baixa possível;
- Desenvolver um *dummy* para o ensaio de capotamento para prever riscos de lesão.

2.4. Regulamento FMVSS220

Existe na actualidade um outro regulamento a par do regulamento *UNECE R66*, que foi criado pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos da América, em 4 de Janeiro de 1977, em que especifica certas premissas para a resistência da superestrutura em autocarros escolares, para acidentes envolvendo o capotamento. Este regulamento denomina-se por *FMVSS 220 - Federal Motor Vehicle Safety Standards*.

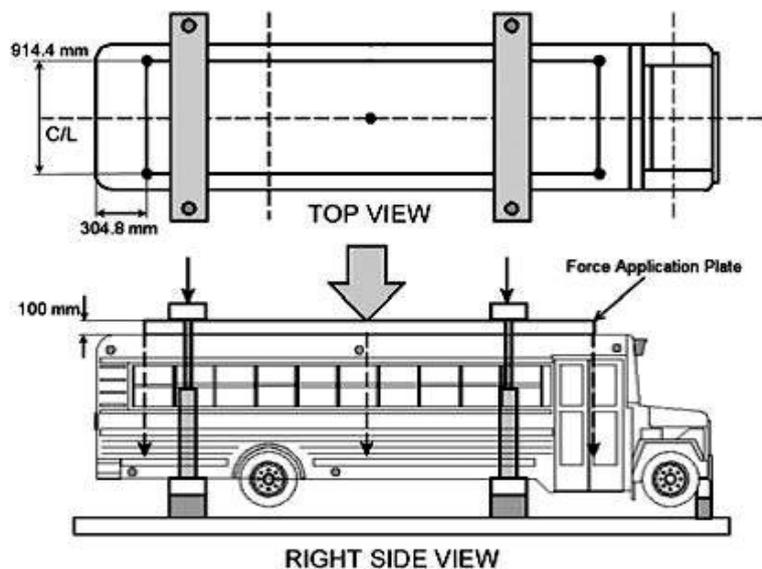


Figura 23 – Método de ensaio segundo a norma *FMVSS 220 (NHTSA, 1991)*

Este regulamento especifica que deve ser testada uma força que deverá ser igual a 1,5x o peso do veículo sem carga, em que esta é aplicada no tejadilho da superestrutura, através de um prato com as características de ser rectangular e rígido. Este prato deve ser carregado com uma velocidade de 12,7 mm/s, como se encontra ilustrado na figura anterior. Como requisito deste regulamento, o deslocamento imposto pelo prato não

Capítulo 2 – Estado da Arte

deve exceder os 130,175 mm. A saída de emergência deve ser capaz de ser aberta durante toda a aplicação da força e após a ausência desta.



Figura 24 - Ensaio segundo a norma *FMVSS 220 (NHTSA, 1991)*

2.5. Enquadramento do processo de homologação em veículos de transportes de passageiros

Ao nível da legislação nacional actualmente em vigor, o decreto-lei 16/2010 de 12 de Março regulamenta a homologação de veículos e seus reboques, transpondo para o direito nacional várias directivas comunitárias, entre elas a 2007/46/CE que “*estabelece um quadro para a homologação dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a serem utilizados nesses veículos*” [7]. Estas directivas têm por base os regulamentos *UNECE*, entidade à qual a comunidade europeia aderiu. Desta forma, os regulamentos *UNECE* que constam em anexo do referido decreto, são reconhecidos como equivalentes às directivas ou regulamentos específicos.

2.5.1. Tipos de veículos de transportes

O Código da Estrada (Decreto-Lei nº 114/94 de 3 de Maio, alterado pelos Decretos- Lei nº 2/98 de 3 de Janeiro, nº 265-A/2001, de 28 de Setembro, nº 44/2005, de 23 de Fevereiro e nº 113/2008, de 1 de Julho) estabelece uma classificação de veículos que podem transitar nas vias públicas e define quais as características que cada classe deve possuir. No que diz respeito aos veículos automóveis, máquinas agrícolas e florestais e máquinas industriais, estes veículos podem ser classificados em:

Capítulo 2 – Estado da Arte

Veículos Ligeiros – categoria que envolve os veículos com peso bruto inferior ou igual a 3500 Kg e com lotação não superior a 9 lugares, incluindo o lugar do condutor.

Veículos Pesados – categoria que envolve os veículos com peso bruto superior a 3500 Kg ou com lotação superior a 9 lugares, incluindo o lugar do condutor.

Quanto à definição de veículos automóveis ligeiros ou pesados, o Código da Estrada refere duas gamas de utilização distintas, que são:

De passageiros – são essencialmente veículos que se destinam ao transporte de passageiros.

De mercadorias – são essencialmente veículos que se destinam ao transporte de cargas.

2.5.2. Homologação de veículos pesados de passageiros, segundo a *Directiva 2007/46/CE*

Segundo a *Directiva 2007/46/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, esta estabelece um quadro para a homologação dos veículos a motor e seus reboques, e dos sistemas, componentes e unidades técnicas destinados a serem utilizados nesses veículos.

Segundo o *IMTT*, a homologação pode ser descrita da seguinte forma: “A homologação é o acto através do qual a autoridade nacional competente ou de outro Estado membro da União Europeia certifica que um modelo de veículo está em conformidade com os requisitos técnicos estabelecidos na legislação e que foi submetido aos ensaios e controlos exigidos” [7]. Definem ainda, quanto à própria homologação três modos, caracterizados como sendo; homologação do modelo, pequena série ou individual. A homologação do modelo é válida para um número ilimitado de veículos do mesmo modelo, a homologação de pequena série é válida para um número limitado de veículos e por último a homologação individual, diz respeito a um único veículo. O organismo em Portugal que está habilitado para conceder homologações em veículos terrestres é o *IMTT*.

Para que um veículo pesado de passageiros possua a homologação deverá cumprir com o Regulamento *UNECE R66*.

2.6. Método de elementos finitos

Por volta dos anos 50, na indústria aeroespacial foi desenvolvido o Método dos Elementos Finitos, com o intuito de determinar o estado de tensão e de deformação de um corpo, estando este sujeito a determinadas e conhecidas acções exteriores. Este método veio auxiliar os projectistas de estruturas a encontrar uma solução para um problema complexo, introduzindo no problema diversas alterações de cariz estrutural de modo a poder-se encontrar a solução óptima para uma estrutura, tendo em conta o aspecto económico e o cumprimento de enquadramentos legais ditados em regulamentos específicos e próprios para cada situação.

Este método expandiu-se rapidamente, devido sobretudo ao aumento das capacidades de processamento dos computadores. O Método de Elementos Finitos é uma aproximação numérica em que se chega a uma solução aproximada de equações integrais e diferenciais que se estabelecem para a totalidade da estrutura ou para elementos da estrutura na forma individual, em que posteriormente são combinados para a obtenção de uma solução final.

2.6.1. Princípio básico de funcionamento do MEF

Normalmente a primeira abordagem que se faz perante um sistema complexo é a substituição do sistema original por partes; esta idealização é um dos conceitos básicos na análise pelo método de elementos finitos e designa-se por *discretização*. A *discretização* do domínio da estrutura permite descrever de forma cada vez mais simplificada o seu comportamento, podendo subdividir-se o domínio em diferentes formas de elementos, dependendo do tipo de análise e da precisão que se quiser obter. Existem três tipos de análise em MEF que se podem efectuar, sendo estes designados de acordo com o problema a estudar, unidimensionais (estruturas do tipo vigas ou treliças), bidimensionais (placas, cascas ou problemas de elasticidade plana) e tridimensionais.

De uma forma geral, o método de elementos finitos consiste em modelar a estrutura como uma montagem de pequenas partes, as quais são chamadas de elementos, onde a conexão dessas pequenas partes é feita não numa área ou linha, mas em pontos discretos, os quais se designam por nós. As cargas distribuídas são aplicadas, de forma

consistente nos nós, ou seja, calcula-se o valor da carga aplicada que irá actuar em cada nó de forma a ser estaticamente equivalente.

Com essa nova modelação analisa-se a estrutura de forma local em cada elemento. Como os diversos elementos da estrutura apenas interagem nos nós, supõe-se que as cargas e deslocamentos actuantes nos nós são os responsáveis pelo estado de tensão ou deformação do elemento e, por conseguinte, da estrutura global. Com esse raciocínio verifica-se que não se necessita saber o comportamento da estrutura ponto a ponto, como é o resultado da solução analítica de uma equação diferencial.

Uma análise efectuada pela técnica de elementos finitos é constituída por 4 passos, que se designam por: Pré-processamento (definição do modelo), Formulação de um elemento finito, Obtenção da solução e Pós-processamento [8].

2.6.2. Programas informáticos existentes

Existem na actualidade diversos códigos comerciais de elementos finitos, pelos quais se podem determinar certas soluções e testadas determinadas situações do mundo real, na qual se enquadra por exemplo, o estudo das ligações tubulares existentes em estruturas de veículos pesados de passageiros com vista à homologação deste tipo de veículos.

Alguns programas de elementos finitos que existem na actualidade são: *ANSYS*[®], *RADIOSS*[®], *PAM-CRASH*[®], *LS-DYNA*[®], *ABAQUS*[®], *MADYMO*[®] e *MSC-DYTRAN*[®]). A título de exemplo, apresentam-se algumas imagens obtidas nesses mesmos programas, em simulações que envolvem estruturas de veículos pesados de passageiros.

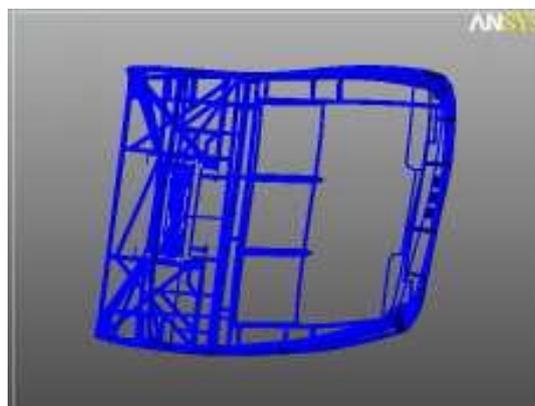


Figura 25 - Simulação informática por MEF – Programa informático ANSYS[®]

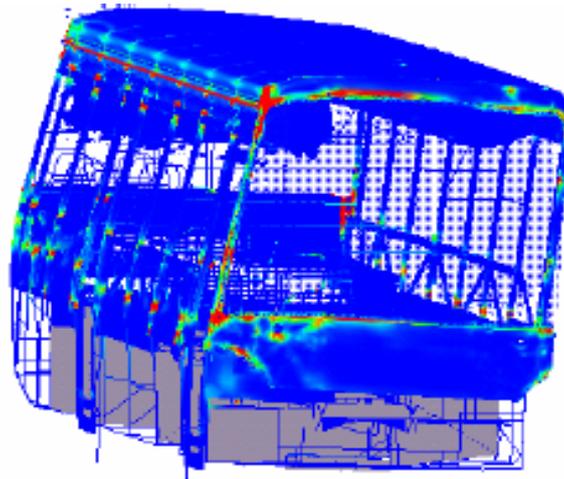


Figura 26 – Estudo de zonas críticas através de programa de simulação informático – Programa informático *RADIOSS*[®] (*Motionsolve*)

2.6.3. Elementos finitos existentes (*Abaqus*[®] 6.11-1)

Nesta Dissertação, utilizou-se para o estudo das ligações tubulares por simulação numérica o *software ABAQUS*[®] 6.11-1, o qual é considerado um programa de referência na área. Este programa possui determinados elementos que podem ser utilizados de acordo com solicitações impostas e refinamentos da malha. Em seguida serão referidos os elementos disponíveis neste *software* e que foram utilizados ao longo desta Dissertação.

Elemento finito C3D8 (elemento linear hexaédrico do tipo *brick*, com oito nós)

Trata-se de um elemento linear hexaédrico com integração completa (integração 2x2). Este tipo de elemento não poderá ser utilizado com materiais com elevado coeficiente de Poisson.

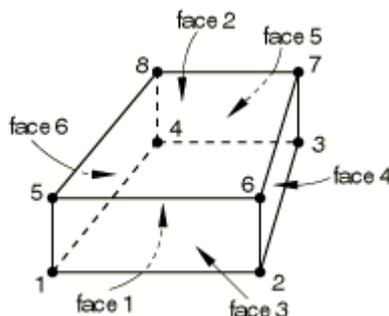


Figura 27 – Elemento finito C3D8 [9]

Capítulo 2 – Estado da Arte

Elemento finito C3D8R (elemento linear hexaédrico do tipo *brick*, com oito nós e com um ponto de integração)

Trata-se de um elemento linear hexaédrico com integração reduzida, tendo um ponto de integração a meio do elemento onde as tensões e deformações são calculadas com bastante precisão.

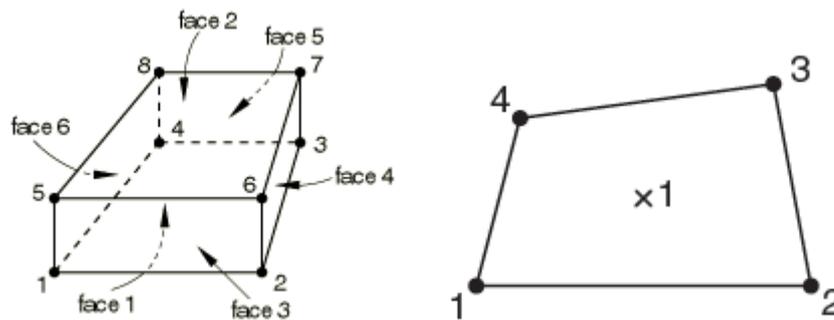


Figura 28 – Elemento finito C3D8R [9]

Elemento finito C3D20 (elemento quadrático do tipo *brick*, com vinte nós)

Trata-se de um elemento quadrático do tipo *brick* com vinte nós em que possui integração completa (integração $3 \times 3 \times 3$). Este é um elemento excelente para o cálculo em análises lineares elásticas devido à boa localização dos pontos de integração. Possui boas características para a captura do fenómeno de concentração de tensões, no entanto este tipo de elemento não possui um bom desempenho para materiais com coeficiente de Poisson elevados.

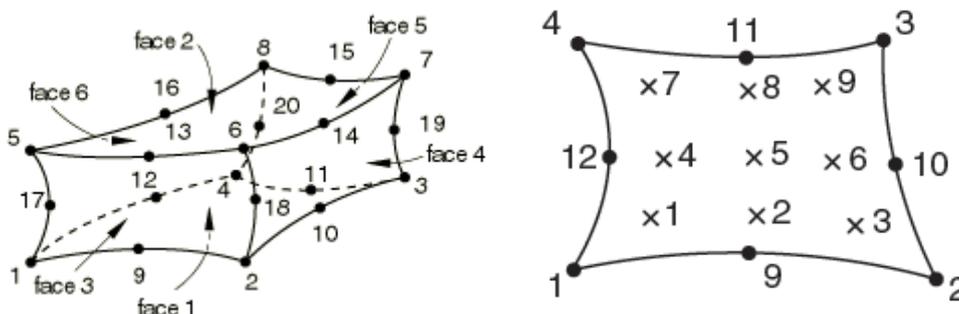


Figura 29 – Elemento finito C3D20 [9]

Elemento finito C3D20R (elemento quadrático do tipo *brick*, com vinte nós, com integração reduzida)

Trata-se de um elemento quadrático do tipo *brick* com vinte nós em que possui integração reduzida. Este elemento finito não possui bom desempenho para situações de concentrações de tensões com malha refinada.

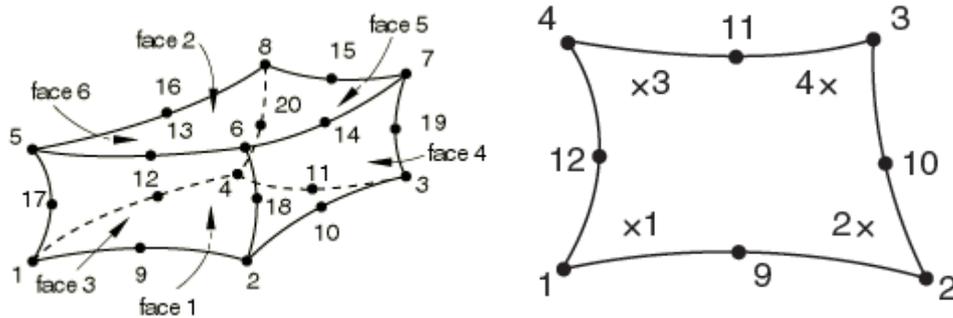


Figura 30 – Elemento finito C3D20R [9]

Elemento finito C3D10 (elemento tetraédrico quadrático com 10 nós)

Trata-se de um elemento tetraédrico quadrático de dez nós que possui quatro pontos de integração. Este elemento possui um bom desempenho para malhas refinadas e apresenta melhores características do que os elementos do tipo C3D20R, para os mesmos graus de liberdade.

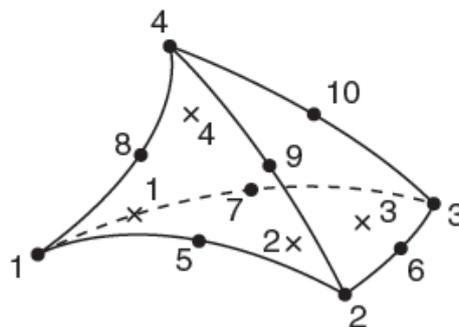


Figura 31 – Elemento finito C3D10 [9]

Capítulo 2 – Estado da Arte

Elemento finito C3D15 (elemento prisma triangular quadrático com 15 nós) - *wedge*

Trata-se de um elemento quadrático de quinze nós com a forma de um prisma triangular, em que se adapta bem a situações envolvendo raios de concordância.

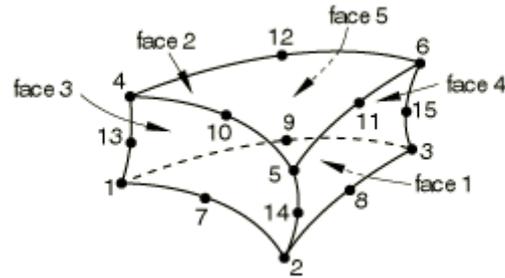


Figura 32 – Elemento finito C3D15 [9]

3. Eurocódigo 3

3.1. Regulamento Eurocódigo 3

A verificação da segurança e o dimensionamento de estruturas metálicas em aço devem seguir este regulamento, fazendo-se uma análise da estrutura globalmente, em que se pode verificar a resistência de algumas secções, de acordo com os seus estados limites últimos [10]. Embora o Eurocódigo 3 tenha sido desenvolvido para estruturas metálicas estáticas e não ter sido desenvolvido para estruturas de veículos pesados de passageiros, neste estudo tomou-se como base o seu subcapítulo de juntas de perfis tubulares onde são tratadas as ligações entre tubos de secção quadrada (RHS), em que nos indica que tipos de ligações tubulares se devem utilizar e os seus modos de ligação, bem como os principais modos de rotura que podem acontecer nestas ligações.

O regulamento faz a seguinte indicação quanto às ligações: para correcta transmissão de esforços, as ligações deverão ter a mesma largura e precaver a utilização de reforços quando necessário, de modo a não haver o colapso de elementos constituintes quando atingida a tensão de rotura do material. Este regulamento é utilizado para o cálculo de juntas sujeitas predominantemente a acções estáticas, utilizando diversas classes de aço, entre eles o aço S275 [10].

3.2. Princípio para o dimensionamento segundo o regulamento Eurocódigo 3

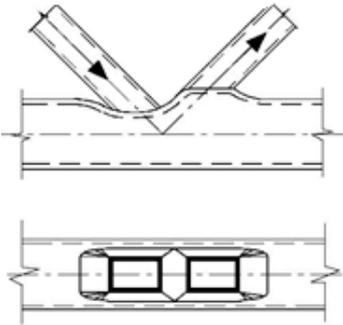
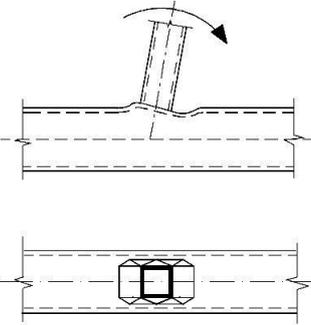
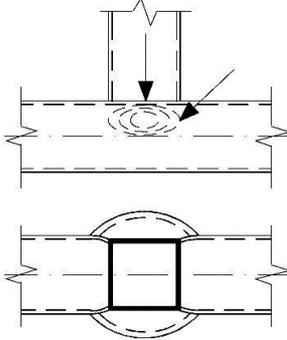
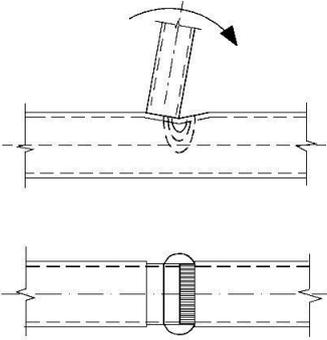
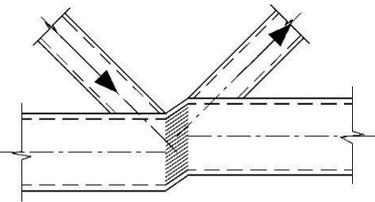
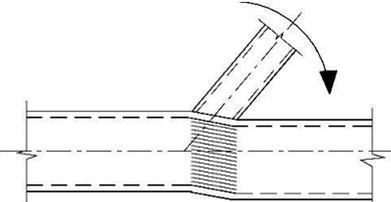
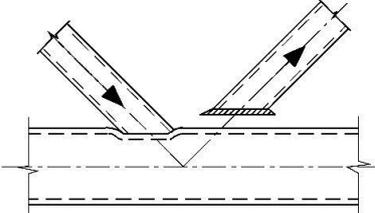
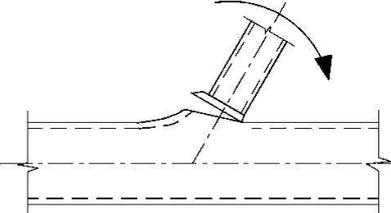
Este regulamento é aplicado para os seguintes estados limites:

- Últimos (segurança das pessoas e da estrutura)
- De utilização (funcionamento da estrutura nas condições normais de utilização, conforto das pessoas e aspecto da construção)
- Estados limites de utilização irreversíveis e reversíveis.

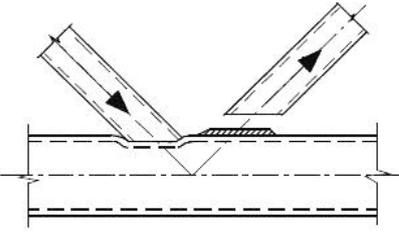
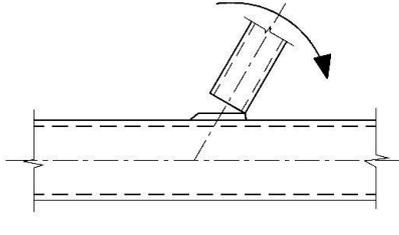
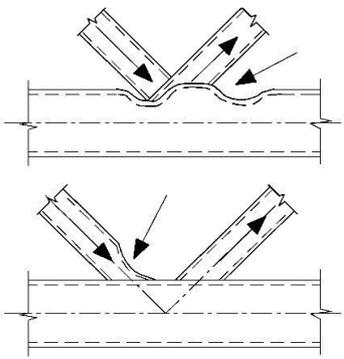
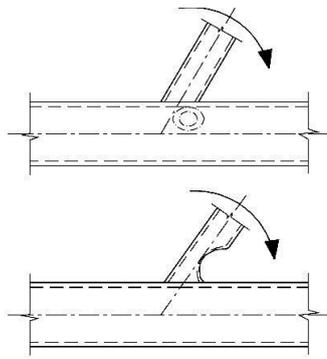
Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Da consulta efectuada ao regulamento [10], verificam-se os diferentes modos de rotura que ocorrem em juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS.

Tabela 3 – Modos de rotura para juntas entre elementos diagonais RHS e cordas RHS, com aplicação de esforços normais e momento flector [10]

Modo	Esforços normais	Momento flector
a		
b		
c		
d		

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Modo	Esforços normais	Momento flector
e		
f		

Os modos de rotura referidos na tabela anterior são:

- Rotura da face da corda ou plastificação da corda;
- Rotura da parede lateral da corda por plastificação, esmagamento ou instabilidade;
- Rotura por corte da corda;
- Rotura por punçoamento de uma parede de corda de secção oca;
- Rotura do elemento diagonal com largura eficaz reduzida;
- Rotura por encurvadura local de um elemento diagonal ou de uma corda de secção oca ao nível da ligação.

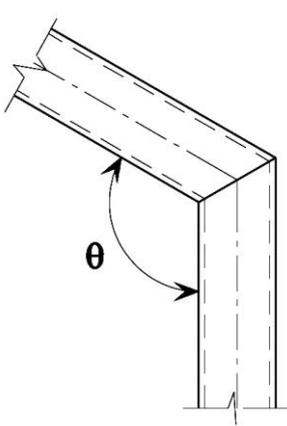
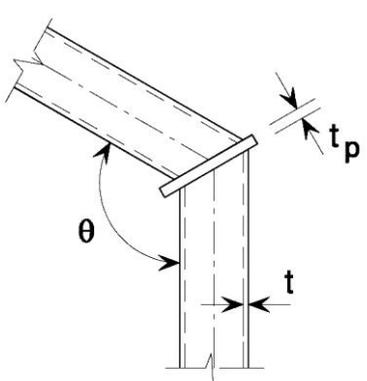
Os esforços normais resistentes aplicados são os valores de carga que originam a plastificação em cada um dos modos de rotura apresentados anteriormente.

O Eurocódigo 3 recomenda para algumas ligações determinados reforços.

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Na tabela seguinte é apresentada uma ligação em junta de cotovelo soldada com a recomendação de um reforço.

Tabela 4 – Critérios de dimensionamento para junta em cotovelo soldada em elementos RHS
[10]

Tipo de junta	Critérios
Junta em cotovelo soldada	
	<p>A secção transversal deverá ser da Classe 1 para a flexão simples, ver a EN 1993-1-1.</p> $N_{ed} \leq 0,2 N_{pl,Rd} \quad \text{e} \quad \frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{pl,Rd}} \leq k$ <p style="text-align: center;">Se $\theta \leq 90^\circ$:</p> $k = \frac{\sqrt[3]{b_o/h_o}}{\left[b_o/t_o \right]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2(b_o/t_o)}$ <p style="text-align: center;">Se $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$:</p> $k = 1 - \sqrt{2} \cos(\theta/2)(1 - k_{90})$ <p>Em que: k_{90° valor de k para $\theta = 90^\circ$</p>
	$t_p \geq 1,5t \quad \text{e} \quad \geq 10 \text{ mm}$ $\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0$

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Onde,

N_{ed} – esforço normal actuante; $N_{pl,Rd}$ – esforço normal plástico resistente; M_{ed} – momento flector actuante; $M_{pl,Rd}$ – momento flector plástico resistente; b_o – largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 0 tipo RHS; h_o – altura total no plano da secção transversal do elemento 0; t_o – espessura da parede do elemento 0 e θ – ângulo (agudo) interno entre o elemento diagonal i e a corda ($i=0,1,2,3\dots$).

Na tabela seguinte são apresentados reforços recomendados pelo Eurocódigo 3 para a ligação em K.

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Tabela 5 – Valores de cálculo da resistência de junta soldada reforçada em K, entre elementos diagonais RHS e corda RHS [10]

Tipo de junta	Valor de cálculo da resistência (i=1 ou 2)
Reforçada com chapas de banzo para evitar a rotura da face da corda, a rotura do elemento diagonal ou o punçoamento	
	$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\text{sen}\theta_1} + g + \frac{h_2}{\text{sen}\theta_2} \right)$ $b_p \geq b_o - 2t_o$ $t_p \geq 2t_1 \text{ e } 2t_2$
Reforçada com duas chapas laterais para evitar a rotura da corda por corte	
	$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\text{sen}\theta_1} + g + \frac{h_2}{\text{sen}\theta_2} \right)$

Onde,

l_p – espessura de uma chapa; h_1 – altura total no plano da secção transversal do elemento 1; θ – ângulo (agudo) interno entre o elemento diagonal i e a corda ($i=0,1,2,3,\dots$); g – afastamento; h_2 – altura total no plano da secção transversal do elemento 2; b_p – largura de uma chapa; b_o – largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 0 tipo RHS; t_o – espessura da parede do elemento 0; t_p – espessura

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

de uma chapa; t_1 - espessura da parede do elemento 1 e t_2 - espessura da parede do elemento 2.

No capítulo 4 serão apresentadas simulações numéricas baseadas em casos descritos no Eurocódigo 3 e nestas serão apresentadas melhorias que foram testadas de modo a procurar aumentar a capacidade resistente das ligações.

O material escolhido para as simulações numéricas e constitutivo das ligações entre perfis tubulares de secção quadrada foi o aço S275 tendo as seguintes propriedades: coeficiente de Poisson de 0,30 e deformação após rotura maior que 20%, tendo sido utilizado Módulo de elasticidade de 210 GPa e tensão de cedência de 275 MPa.

3.3. Estudo de casos do Eurocódigo 3

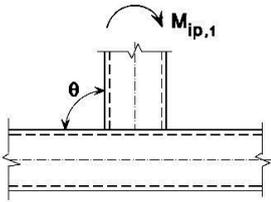
Para o estudo segundo este regulamento foram escolhidas três ligações, em que as mesmas representam algumas ligações que se poderão encontrar na construção de veículos pesados de passageiros, por exemplo na zona de ligação entre pilares na zona da bagageira e entre montantes e arco de segurança.

3.3.1. Caso 1

Neste caso, o tipo de ligação preconizado no Eurocódigo 3 é uma junta soldada em T, constituída por dois perfis tubulares de secção quadrada. Esta ligação foi escolhida como fazendo parte de diversas ligações existentes na construção de veículos pesados de passageiros.

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Tabela 6 – Expressões para o cálculo de momentos flectores actuantes numa junta em T [10]

Juntas em T e em X	Valor de cálculo da resistência
Momentos no plano ($\theta=90^\circ$)	Rotura da face da corda (tubo principal 0) - ($\beta \leq 0,85$)
	$M_{ip,1.Rd} = k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right) / \gamma_{M5}$
	Esmagamento da parede lateral da corda (tubo principal 0) - ($0,85 < \beta \leq 1,0$)
	$M_{ip,1.Rd} = 0,5 f_{yk} t_0 (h_1 + 5t_0)^2$ $f_{yk} = f_{y0}$

Onde,

$M_{ip,1.Rd}$ – valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do momento flector actuante no plano do elemento 1; k_n – factor de índice n , f_{y0} – tensão de cedência do elemento 0; t_0 - espessura da parede do elemento 0; h_1 - altura total no plano da secção transversal do elemento 1; η – relação entre a altura do elemento diagonal e o diâmetro ou largura da corda; β – relação entre a largura ou o diâmetro médios dos elementos diagonais e o da corda e γ_{M5} – coeficiente de segurança parcial,

Para esta situação foram escolhidos dois perfis tubulares de secção quadrada, tendo o tubo principal as dimensões 60x60x6 [mm] e o tubo secundário as dimensões 40x40x3 [mm], os dois possuem o mesmo material constituinte (aço S275) de tensão de cedência de 275 MPa. O Eurocódigo 3 prevê para esta situação um coeficiente de segurança parcial $\gamma_{M5} = 1$ [10].

3.3.1.1. Cálculos efectuados para o caso 1

O momento flector resistente que origina a rotura da face da corda (rotura do tubo principal), foi calculado através dos parâmetros da ligação em T e das seguintes expressões:

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \quad (1)$$

O valor de k_n é 1,30 (pois $n = 0$), devido ao tubo principal estar na ausência de esforços aplicados.

$$n = (\sigma_{0,Ed} / f_{y0}) / \gamma_{M5} = 0 \quad (2)$$

Onde,

f_{y0} - tensão de cedência no elemento 0; $\sigma_{0,Ed}$ - tensão de compressão máxima a que está sujeita a corda na secção da junta; β - relação entre a largura ou o diâmetro médios dos elementos diagonais e o da corda; k_n - factor de índice n e γ_{M5} - coeficiente de segurança parcial.

Tabela 7 – Parâmetros da ligação – Caso 1

Parâmetros da ligação do Caso 1 Eurocódigo 3 (Ligação em T)	
t_0	3 mm
h_1	40 mm
b_0	60 mm
b_1	40 mm
$\beta = b_1 / b_0$	0,67
$\eta = h_1 / b_0$	0,67
k_n	1,30
f_{y0}	275 MPa
γ_{M5}	1

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Através da expressão para este caso (rotura da face da corda) para uma junta em T e tendo em conta os parâmetros retirados da Tabela 6, o momento resistente calculado para esta junta é 800 N·m.

Este momento foi aplicado a esta junta e simulada numericamente, os resultados obtidos são apresentados neste capítulo. De notar que o regulamento Eurocódigo 3 não prevê qualquer reforço para esta ligação.

3.3.2. Caso 2

Neste caso o tipo de ligação preconizado pelo Eurocódigo 3 é uma junta soldada em K com um determinado afastamento g . Neste tipo de ligação existem três tubos, um tubo principal 0 com as dimensões $60 \times 60 \times 3$ [mm] e dois tubos secundários de dimensões $40 \times 40 \times 3$ [mm] - tubo secundário 1 e $50 \times 50 \times 3$ [mm] - tubo secundário 2. Para esta situação os três tubos de secção quadrada possuem a mesma tensão de cedência (275 MPa), no qual foi considerado um coeficiente de segurança parcial $\gamma_{M5} = 1$ [10].

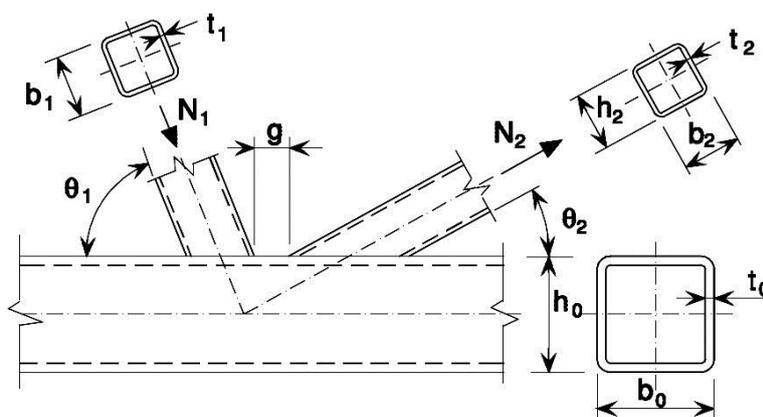


Figura 33 – Parâmetros geométricos de uma ligação em K com afastamento e com três perfis tubulares de secção quadrada, em que: 0 – tubo principal; 1 e 2 – tubos secundários [10]

3.3.2.1. Cálculos efectuados para o caso 2

Nesta ligação existem quatro modos de rotura (Rotura da face da corda, Corte na Corda, Rotura do elemento diagonal e Punçoamento), em que se irá calcular os valores dos esforços normais resistentes que originam estes modos de rotura, de acordo com as expressões apresentadas nas tabelas 8 e 9.

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Tabela 8 – Valores de cálculo do esforço normal resistente para os tubos secundários 1 e 2 da junta de ligação K [10]

Valores de resistência (i = 1 ou 2), para os diferentes modos de rotura	
Rotura da face da corda	$N_{i,Rd} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right)}{\text{sen}\theta_i \gamma_{M5}}$
Corte na Corda	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \text{sen}\theta_i} / \gamma_{M5}$
Rotura do elemento diagonal	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$
Punçamento	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \text{sen}\theta_i} \left(\frac{2h_i}{\text{sen}\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$

Tabela 9 – Expressões para determinação de características geométricas da junta de ligação K [10]

$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) t_0$ <p style="text-align: center;">Para um elemento diagonal quadrado ou rectangular:</p> $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}$ <p>Em que:</p> <p><i>g</i> afastamento entre os tubos secundários 1 e 2</p>	$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$ <p>Mas $b_{eff} \leq b_i$</p> <hr/> $b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i$ <p>Mas $b_{e,p} \leq b_i$</p> <hr/> <p>Para $n > 0$ (compressão)</p> $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ <p>Mas $k_n \leq 1,0$</p>
---	--

Onde,

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

$N_{i,Rd}$ – valor de cálculo da resistência da junta, expresso em termos do esforço normal actuante no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3); k_n - factor de índice n ; f_{yi} – tensão de cedência no elemento i ($i=0,1,2$ ou 3); t_0 - espessura da parede do elemento 0; γ – relação entre a largura ou o diâmetro da corda e o dobro da espessura da sua parede; b_o - largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 0 tipo RHS; b_1 - largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 1 tipo RHS; b_2 - largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento 2 tipo RHS; h_1 - altura total no plano da secção transversal do elemento 1; h_2 - altura total no plano da secção transversal do elemento 2; A_v – área de corte da corda; θ – ângulo (agudo) interno entre o elemento diagonal i e a corda ($i=1,2,3\dots$); γ_{M5} – coeficiente de segurança parcial; h_i - altura total no plano da secção transversal do elemento i ($i=1,2$ ou 3); t_i - espessura da parede do elemento i ($i=1,2$ ou 3); b_i - largura total na direcção perpendicular ao plano do elemento i tipo RHS ($i=1,2$ ou 3); b_{eff} – largura efectiva da ligação de um elemento diagonal a uma corda; $b_{e,p}$ – largura efectiva para a resistência ao punçoamento e g – afastamento.

Os esforços normais resistentes aplicados nos tubos secundários 1 e 2 que originam os modos de rotura representados nas tabelas 8 e 9 foram calculados através dos parâmetros geométricos da ligação K, sendo estes dados através das seguintes expressões:

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \quad (3)$$

O valor de k_n é 1,30 (pois $n = 0$), devido ao tubo principal estar na ausência de esforços aplicados.

$$n = (\sigma_{0,Ed} / f_{y0}) / \gamma_{M5} = 0 \quad (4)$$

Onde,

f_{y0} - tensão de cedência no elemento 0; $\sigma_{0,Ed}$ – tensão de compressão máxima a que está sujeita a corda na secção da junta; β – relação entre a largura ou o diâmetro médios dos

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

elementos diagonais e o da corda; k_n – factor de índice n e γ_{M5} – coeficiente de segurança parcial.

Tabela 10 – Cálculo dos esforços normais resistentes dos tubos secundários 1 e 2 para os diferentes modos de rotura

Parâmetros gerais da ligação - Caso 2 Eurocódigo 3 (Ligação K)			
t_0	3 mm		
t_1	3 mm		
t_2	3 mm		
h_1	40 mm		
h_2	50 mm		
b_0	60 mm		
b_1	40 mm		
b_2	50 mm		
$f_{y0} = f_{y1} = f_{y2}$	275 MPa		
γ_{M5}	1		
k_n	1,3		
Rotura da face da corda			
<i>Parâmetros específicos</i>		Resultados	
$\gamma = b_0/2t_0$	10	$N_{1,rd}$ (compressão)	135831,29 N
$\sin \theta_1 (\theta = 30^\circ)$	0,5	$N_{2,rd}$ (tracção)	187836,42 N
$\sin \theta_2 (\theta = 40^\circ)$	0,643		
Corte na corda			
<i>Parâmetros específicos</i>		Resultados	
$g = 2t_0$	6 mm	$N_{1,rd}$ (compressão)	60823,26 N
α	0,397	$N_{2,rd}$ (tracção)	47312,1 N
$A_v = (2h_0 + \alpha b_0)t_0$	191,54 mm ²		
Rotura do elemento diagonal			
<i>Parâmetros específicos</i>		Resultados	
$b_{eff} (1)$	20	$N_{1,rd}$ (compressão)	66048 N
$b_{eff} (2)$	25	$N_{2,rd}$ (tracção)	82563 N
Punçoamento			
<i>Parâmetros específicos</i>		Resultados	
$b_{e,p} (1)$	20	$N_{1,rd}$ (compressão)	1172,4 N
$b_{e,p} (2)$	25	$N_{2,rd}$ (tracção)	961,25 N

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Para este caso o Eurocódigo 3 recomenda um reforço representado na tabela seguinte, em que uma chapa de reforço é colocada entre os tubos secundários e o tubo principal por forma a evitar os seguintes modos de rotura: rotura da face da corda, rotura do elemento diagonal e o punçoamento.

Tabela 11 – Reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para junta de ligação K [10]

	$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\text{sen} \theta_1} + g + \frac{h_2}{\text{sen} \theta_2} \right)$ $b_p \geq b_0 - 2t_0$ $t_p \geq 2t_1 \text{ e } 2t_2$
--	---

Tabela 12 – Parâmetros geométricos do reforço – Caso 2

Parâmetros geométricos do reforço - Caso 2	
$\text{sen} \theta_1 (\theta = 30^\circ)$	0,5
$\text{sen} \theta_2 (\theta = 40^\circ)$	0,643
g	6 mm
l_p	245,19 mm
b_p	54 mm
t_p	6 mm

3.3.3. Caso 3

Neste caso, o tipo de ligação preconizado no Eurocódigo 3 é uma junta em cotovelo soldada, em que existem dois tubos de secção quadrada com as dimensões 60x60x3 [mm] estando ligados a 135° e em que se aplica um momento flector actuante de 5052 N·m, para a condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,2$. Esta ligação poderá ser considerada uma aproximação a um elemento pertencente a um arco de segurança. Os parâmetros de cálculo para esta ligação encontram-se apresentados na tabela 13.

3.3.3.1. Cálculos efectuados para o caso 3

Para esta ligação (junta em cotovelo soldada) foram utilizados os seguintes parâmetros e calculados os momentos actuantes na ligação para duas situações distintas.

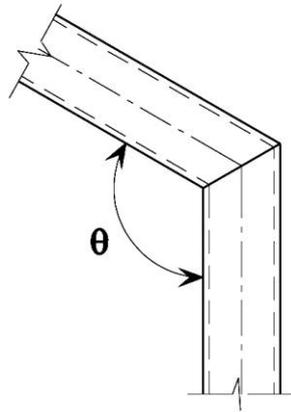


Figura 34 – Junta em cotovelo soldada [10]

Tabela 13 – Parâmetros da junta em cotovelo soldada

Parâmetros da ligação - Caso 3 (junta em cotovelo soldada)	
t_0	3 mm
h_0	60 mm
b_0	60 mm
k_{90°	0,606
k_{135°	0,787
$\cos \theta$ (para $\theta = 135^\circ$)	0,383
área (perfil 60x60x3)	684 mm ²
f_{y0}	275 MPa
γ_{M5}	1

O valor do esforço normal plástico, $N_{pl,Rd}$, foi calculado através de:

$$N_{pl,Rd} = f_{y0} * (\text{área } 60 * 60 * 3) \tag{5}$$

Assim sendo, obtém-se $N_{pl,Rd} = 188100$ N.

O valor do momento resistente plástico ($M_{pl,Rd}$) é o momento mínimo que quando aplicado coloca toda a secção em regime plástico, sendo a curva de comportamento do

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

material elastoplástico. Quando a capacidade resistente da secção é ultrapassada, inicia-se a formação de uma rótula plástica, criando-se assim um mecanismo que origina o colapso da secção.

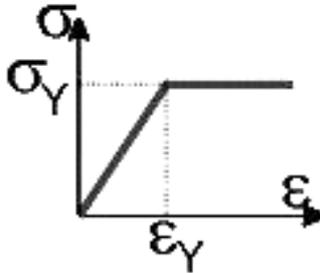


Figura 35 – Curva de material elastoplástico

Determinou-se a posição do centróide (\bar{y}) acima do eixo neutro para a peça tubular de secção quadrada 60x60x3 [mm].

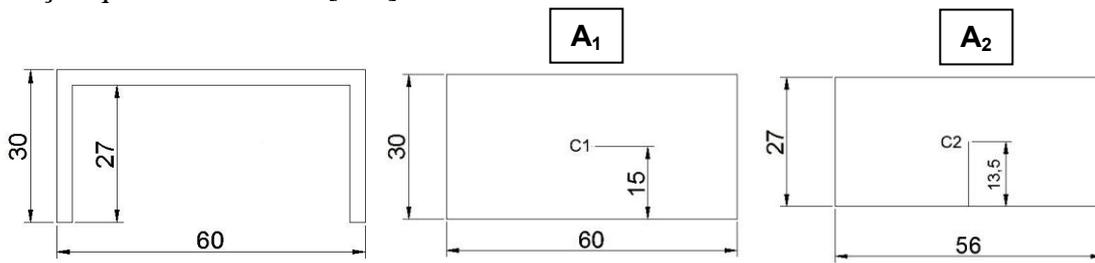


Figura 36 – Cálculo da posição do centróide do tubo 60x60x3 [mm]

$$(A_1 - A_2) \times \bar{y} = A_1 \times \bar{y}_1 - A_2 \times \bar{y}_2 \quad (6)$$

Em que, A_1 (área 30x60) = 1800 mm², A_2 (área 27x56) = 1512 mm²

$$\bar{y}_1 = 15 \text{ mm e } \bar{y}_2 = 13,50 \text{ mm}$$

A posição do centróide (\bar{y}) é dada pela expressão (6), tendo o valor de 22,88 mm.

O momento resistente plástico ($M_{pl,Rd}$) é aplicado a duas áreas, uma acima do eixo neutro e outra abaixo desta e é dado pela seguinte expressão:

$$M_{pl,Rd} = f_{y0} \times 2 \times (\text{área tubo } 60 \times 60 \times 3) \times \bar{y} \quad (7)$$

Assim sendo, obtém-se $M_{pl,Rd} = 8607 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Capítulo 3 – Eurocódigo 3

Para esta ligação existem duas condições que tem em conta a seguinte expressão:

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,rd}} + \frac{M_{ed}}{M_{pl,Rd}} \leq k \quad (8)$$

Para a primeira condição $N_{ed} = 0$, a mesma origina um momento actuante de 6774 N·m

e a segunda condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,20$, origina um momento actuante de 5052 N·m.

Na simulação numérica deste caso irá-se ter em conta a segunda situação.

4. Simulação numérica pelo Método de Elementos Finitos

4.1. Selecção do tipo de elemento a utilizar nas simulações numéricas

Para a selecção do tipo de elemento finito a ser utilizado nas simulações numéricas das ligações tubulares de alguns casos descritos no Eurocódigo 3, fizeram-se análises de sensibilidade à malha em três tubos de secção quadrada com diferentes espessuras, nomeadamente 3, 6 e 8 mm e analisaram-se os elementos descritos anteriormente, tendo-se retirado conclusões.

Desenvolveu-se em primeiro lugar um estudo com tubos de secção quadrada de dimensões 60×60×3 [mm], tendo-se aplicado um momento de 1200 N·m dividido por 8 nós na extremidade de um tubo com elementos do tipo casca, encontrando-se a outra extremidade com a aplicação de um encastramento como condição fronteira. Em segundo lugar variou-se o tamanho de elemento na espessura e estudaram-se vários tipos de elementos, tendo-se retirado o valor de deslocamento e de tensão num ponto superior da face superior do tubo para as diferentes configurações que a seguir se descrevem. Para a ligação entre o tubo em elementos sólidos e a extremidade do tubo com elementos do tipo casca utilizou-se uma ligação que no programa informático Abaqus[®] se denomina por *Shell to solid coupling*.

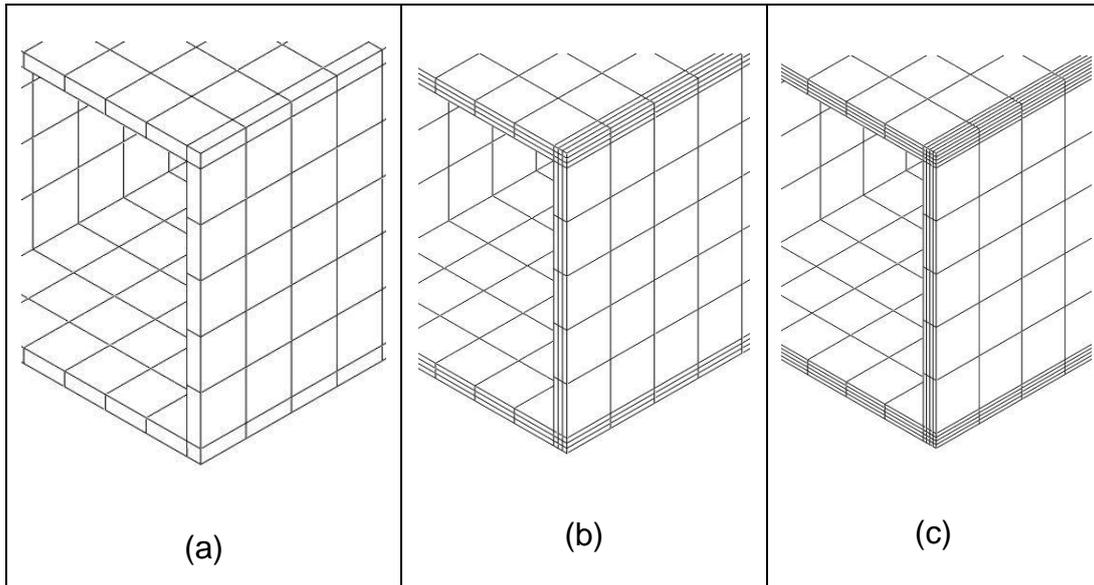


Figura 37 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60*60*3 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura

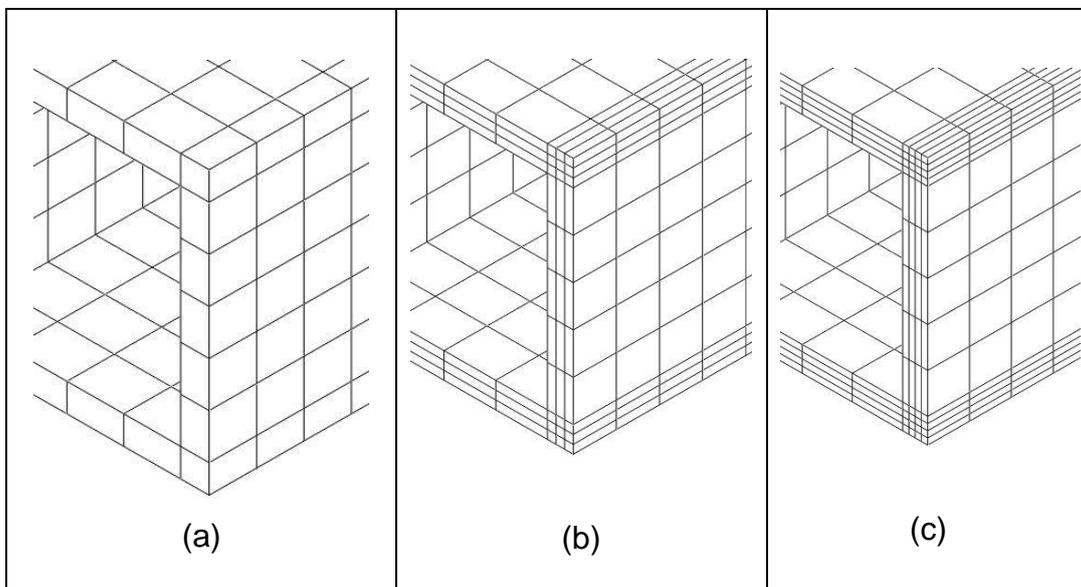


Figura 38 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60*60*6 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura

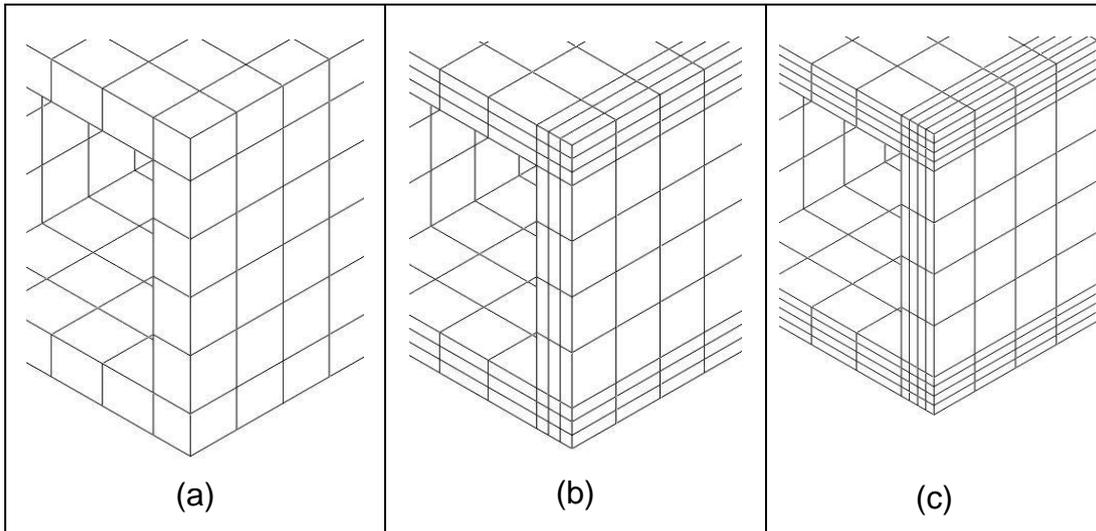


Figura 39 – Pormenor da malha de um tubo de dimensões 60*60*8 [mm] com elementos sólidos do tipo C3D20; a) Malha com um elemento na espessura, b) Malha com três elementos na espessura, c) Malha com quatro elementos na espessura

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 14 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×3 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento

Simulações numéricas	Deslocamento esperado-valor analítico (ponto superior) [mm]	Deslocamento obtido (ponto superior) [mm]	Erro em relação ao valor analítico do deslocamento	
TUBO 60×60×3 [mm]				
1 elemento na espessura				
Elemento C3D8	1,2308	1,2221	-0,0071	
Elemento C3D8R		1,2002	-0,0249	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		1,2256	-0,0042	
Elemento C3D20		1,2272	-0,0029	
Elemento C3D20R		1,2282	-0,0021	
Elemento C3D10I		1,2269	-0,0032	
Elemento C3D10M		1,2275	-0,0027	
3 elementos na espessura				
Elemento C3D8		1,2221	-0,0071	
Elemento C3D8R		1,2387	0,0064	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		1,2256	-0,0042	
Elemento C3D20		1,2273	-0,0028	
Elemento C3D20R		1,2283	-0,0020	
Elemento C3D10I	1,2272	-0,0029		
Elemento C3D10M	1,2276	-0,0026		
4 elementos na espessura				
Elemento C3D8	1,2220	-0,0072		
Elemento C3D8R	1,2384	0,0062		
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	1,2256	-0,0042		
Elemento C3D20	1,2273	-0,0028		
Elemento C3D20R	1,2283	-0,0020		
Elemento C3D10I	1,2272	-0,0029		
Elemento C3D10M	1,2276	-0,0026		

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 15 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×3 [mm] com um elemento na espessura, ao nível da tensão de von Mises

Simulações numéricas	Tensão de von Mises no topo do Sólido (analítico) (MPa)	Tensão de von Mises no topo do Sólido (obtida) (MPa)	Erro em relação ao valor analítico da tensão de von Mises
TUBO 60×60×3 [mm]			
1 elemento na espessura			
Elemento C3D8	96,9274	96,2660	-0,0068
Elemento C3D8R		92,9694	-0,0408
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		92,1259	-0,0495
Elemento C3D20		96,4500	-0,0049
Elemento C3D20R		96,4284	-0,0052
Elemento C3D10I		96,4110	-0,0053
Elemento C3D10M		96,8508	-0,0008
3 elementos na espessura			
Elemento C3D8		96,7202	-0,0021
Elemento C3D8R		95,6752	-0,0129
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		95,2741	-0,0171
Elemento C3D20		96,4486	-0,0049
Elemento C3D20R		96,4064	-0,0054
Elemento C3D10I	96,459	-0,0048	
Elemento C3D10M	96,4284	-0,0052	
4 elementos na espessura			
Elemento C3D8	96,7739	-0,0016	
Elemento C3D8R	96,5183	-0,0042	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	95,664	-0,0130	
Elemento C3D20	96,4501	-0,0049	
Elemento C3D20R	96,4050	-0,0054	
Elemento C3D10I	96,4619	-0,0048	
Elemento C3D10M	97,2213	0,0030	

Igualmente se realizou um estudo comparativo para um tubo com as dimensões de 60×60×6 [mm], tendo-se verificado os valores de deslocamento e de tensões, que se apresentam nas tabelas 16 e 17, para diversos elementos e com variação do número de elementos por espessura.

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 16 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60*60*6 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento

Simulações numéricas	Deslocamento esperado – valor analítico (ponto superior) [mm]	Deslocamento obtido (ponto superior) [mm]	Erro em relação ao valor analítico do deslocamento
TUBO 60*60*6 [mm]			
1 elemento na espessura			
Elemento C3D8	0,7169	0,7114	-0,0077
Elemento C3D8R		0,7204	0,0049
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		0,7138	-0,0043
Elemento C3D20		0,7146	-0,0032
Elemento C3D20R		0,7150	-0,0027
Elemento C3D10I		0,7146	-0,0032
Elemento C3D10M		0,7150	-0,0027
3 elementos na espessura			
Elemento C3D8		0,7109	-0,0084
Elemento C3D8R	0,7204	0,0049	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	0,7138	-0,0043	
Elemento C3D20	0,7148	-0,0029	
Elemento C3D20R	0,7152	-0,0024	
Elemento C3D10I	0,7148	-0,0029	
Elemento C3D10M	0,7150	-0,0027	
4 elementos na espessura			
Elemento C3D8	0,7109	-0,0084	
Elemento C3D8R	0,7203	0,0047	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	0,7138	-0,0043	
Elemento C3D20	0,7152	-0,0024	
Elemento C3D20R	0,7152	-0,0024	
Elemento C3D10I	0,7148	-0,0029	
Elemento C3D10M	0,7150	-0,0027	

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 17 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60*60*6 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível da tensão de von Mises

Simulações numéricas	Tensão de von Mises no topo do Sólido (analítico) (MPa)	Tensão de von Mises no topo do Sólido (obtida) (MPa)	Erro em relação ao valor analítico da tensão de von Mises	
TUBO 60*60*6 [mm]				
1 elemento na espessura				
Elemento C3D8	56,4588	55,6055	-0,0151	
Elemento C3D8R		51,6067	-0,0859	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		50,8972	-0,0985	
Elemento C3D20		56,4109	-0,0009	
Elemento C3D20R		56,4089	-0,0009	
Elemento C3D10I		56,4178	-0,0007	
Elemento C3D10M		57,4137	0,0169	
3 elementos na espessura				
Elemento C3D8		56,2411	-0,0039	
Elemento C3D8R		55,0824	-0,0244	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		54,6448	-0,0321	
Elemento C3D20		56,4094	-0,0009	
Elemento C3D20R		56,3997	-0,0011	
Elemento C3D10I		57,4137	0,0169	
Elemento C3D10M		57,245	0,0139	
4 elementos na espessura				
Elemento C3D8		56,3072	-0,0027	
Elemento C3D8R		55,5584	-0,0159	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	55,1134	-0,0238		
Elemento C3D20	54,6519	-0,0320		
Elemento C3D20R	56,3996	-0,0011		
Elemento C3D10I	56,4101	-0,0009		
Elemento C3D10M	57,3451	0,01570		

Igualmente se realizou um estudo comparativo para um tubo com as dimensões de 60*60*8 [mm], tendo-se verificado os valores de deslocamento e de tensões que se apresentam nas tabelas 18 e 19, para diversos elementos e com variação do número de elementos por espessura.

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 18 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60×60×8 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível de deslocamento

Simulações numéricas	Deslocamento esperado-valor analítico (ponto superior) [mm]	Deslocamento obtido (ponto superior) [mm]	Erro em relação ao valor analítico do deslocamento	
TUBO 60×60×8 [mm]				
1 elemento na espessura				
Elemento C3D8	0,5955	0,5915	-0,0067	
Elemento C3D8R		0,6030	0,0126	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		0,5927	-0,0047	
Elemento C3D20		0,5934	-0,0035	
Elemento C3D20R		0,5935	-0,0034	
Elemento C3D10I		0,5934	-0,0035	
Elemento C3D10M		0,5937	-0,0030	
3 elementos na espessura				
Elemento C3D8		0,5906	-0,0082	
Elemento C3D8R		0,5998	0,0072	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		0,5927	-0,0047	
Elemento C3D20		0,5934	-0,0035	
Elemento C3D20R		0,5938	-0,0029	
Elemento C3D10I	0,5934	-0,0035		
Elemento C3D10M	0,5937	-0,0030		
4 elementos na espessura				
Elemento C3D8	0,5906	-0,0082		
Elemento C3D8R	0,5996	0,0069		
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	0,5927	-0,0047		
Elemento C3D20	0,5934	-0,0035		
Elemento C3D20R	0,5937	-0,0030		
Elemento C3D10I	0,5935	-0,0034		
Elemento C3D10M	0,5937	-0,0030		

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 19 – Estudo de elementos finitos para um tubo de dimensões 60*60*8 [mm] com variação do número de elementos na espessura, ao nível da tensão de von Mises

Simulações numéricas	Tensão de von Mises no topo do Sólido (analítico) (MPa)	Tensão de von Mises no topo do Sólido (obtida) (MPa)	Erro em relação ao valor analítico da tensão de von Mises	
TUBO 60*60*8 [mm]				
1 elemento na espessura				
Elemento C3D8	46,8958	46,0012	-0,0191	
Elemento C3D8R		42,1251	-0,1017	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		40,7103	-0,1319	
Elemento C3D20		46,9004	0,00009	
Elemento C3D20R		46,9039	0,0001	
Elemento C3D10I		46,8828	-0,0003	
Elemento C3D10M		48,0719	0,0251	
3 elementos na espessura				
Elemento C3D8		46,6695	-0,0048	
Elemento C3D8R		45,1859	-0,0365	
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos		44,8613	-0,0434	
Elemento C3D20		46,8796	-0,0004	
Elemento C3D20R		46,8798	-0,0003	
Elemento C3D10I		46,8766	-0,0004	
Elemento C3D10M		47,6311	0,0157	
4 elementos na espessura				
Elemento C3D8	46,7389	-0,0033		
Elemento C3D8R	46,0873	-0,0172		
Elemento C3D8R com Controlo de Modos de energia nulos	45,379	-0,0323		
Elemento C3D20	46,8768	-0,0004		
Elemento C3D20R	46,8764	-0,0004		
Elemento C3D10I	46,8766	-0,0004		
Elemento C3D10M	47,6867	0,0169		

4.1.1. Conclusões da selecção do tipo de elemento

Através da análise das tabelas de resultados de deslocamentos e tensões para os diferentes perfis tubulares de secção quadrada, em que se variou o número de elementos por espessura, pode-se concluir que se conseguem bons resultados com os elementos sólidos C3D20, mesmo apenas com um único elemento na espessura. Comparando com alguns dos elementos do tipo tetraédrico, o elemento C3D20 permite obter bons resultados com um tempo computacional mais reduzido do que com os elementos do tipo tetraédrico.

Quanto maior for o número de pontos de integração, maior será o esforço de cálculo, mas o mesmo também aumenta a precisão dos resultados obtidos. Existem dois métodos que aumentam a precisão dos resultados, nomeadamente o aumento do número de nós (que aumenta o grau das funções de interpolação) e o refinamento da malha.

Com o aumento do número de elementos por espessura, verifica-se que os resultados obtidos não convergem para o valor teórico; isto deve-se a não se ter mantido uma relação dimensão máxima/dimensão mínima dentro de valores razoáveis. Por essa razão, este aspecto foi devidamente tido em conta nas simulações cujos resultados são apresentados posteriormente.

Pelo bom desempenho deste elemento (C3D20), este foi o elemento seleccionado para realizar as simulações numéricas das ligações tubulares preconizadas pelo Eurocódigo 3.

4.2. Simulação numérica de casos do Eurocódigo 3

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas efectuadas para os três casos escolhidos do Eurocódigo 3. Nas simulações numéricas foi utilizado o programa de simulação numérica *Abaqus*[®] 6.11-1, com o tipo de elemento sólido *brick* quadrático de vinte nós C3D20 utilizando-se três elementos ao longo da espessura (para os casos 1 e 3) no caso 2 utilizando-se oito elementos ao longo da espessura. Foi utilizado como material constitutivo dos tubos de secção quadrada o aço S275.

4.2.1. Simulação numérica do caso 1 – Ligação T

Numa primeira abordagem a este caso simulou-se um tubo simples de dimensões 40x40x3 [mm] de modo a representar o tubo secundário da ligação em T, tendo-se determinado a tensão de von Mises instalada no topo superior quando sujeito a um momento flector actuante ($M_{ip,1,Rd}$) calculado pela expressão da rotura da face da corda, com o valor total de 800 N·m. Na simulação numérica foram utilizados elementos sólidos do tipo *brick* C3D20, com três elementos ao longo da espessura, tendo-se aplicado o momento flector actuante distribuído por 8 nós na extremidade de um tubo com elementos do tipo casca. Na extremidade do tubo simples utilizou-se um encastramento como condição fronteira.

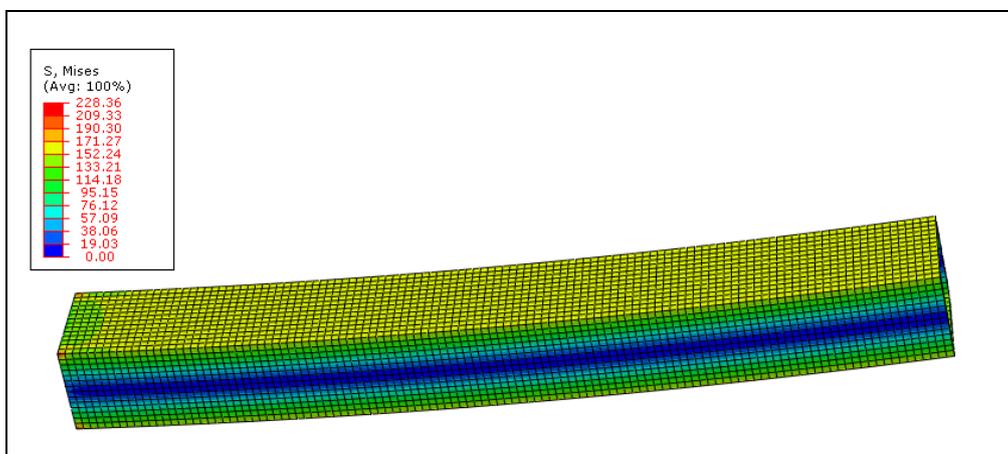


Figura 40 – Simulação de um tubo 40x40x3 [mm] encastrado numa das extremidades e sujeito a um momento flector previsto pelo Eurocódigo 3 (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

A tensão instalada verificada no topo deste tubo simplesmente encastrado é 154 MPa (56% da tensão de cedência), em que este será o valor de referência para o dimensionamento do tubo secundário. Para a ligação em T (entrando agora no caso previsto pelo Eurocódigo 3), os tubos principal e secundário foram simulados numericamente com elementos sólidos do tipo *brick* C3D20, tendo três elementos ao longo da espessura. Não foram utilizadas não-linearidades geométricas. Para a simulação do cordão de soldadura com penetração total utilizou-se uma malha de elementos contínua como aproximação, entre elementos adjacentes. Aplicou-se o momento flector resistente, em que este foi dividido por 8 nós, numa extremidade de um tubo com elementos do tipo casca, com o valor total de 800 N·m. Nas duas extremidades do tubo principal aplicaram-se encastramentos.

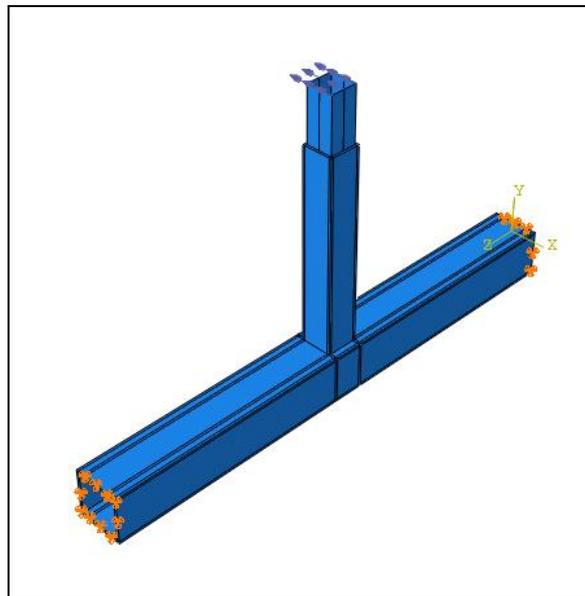


Figura 41 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira na junta soldada em T – Situação 1a

4.2.1.1. Apresentação de resultados e identificação de zonas críticas

Para esta ligação foi criada uma malha de elementos finitos em que foi calculada a tensão máxima instalada em dois pontos (no meio da ligação entre o tubo secundário e o tubo principal e no canto exterior da ligação). Os resultados obtidos ao nível de tensões instaladas na ligação encontram-se apresentados nas figuras seguintes.

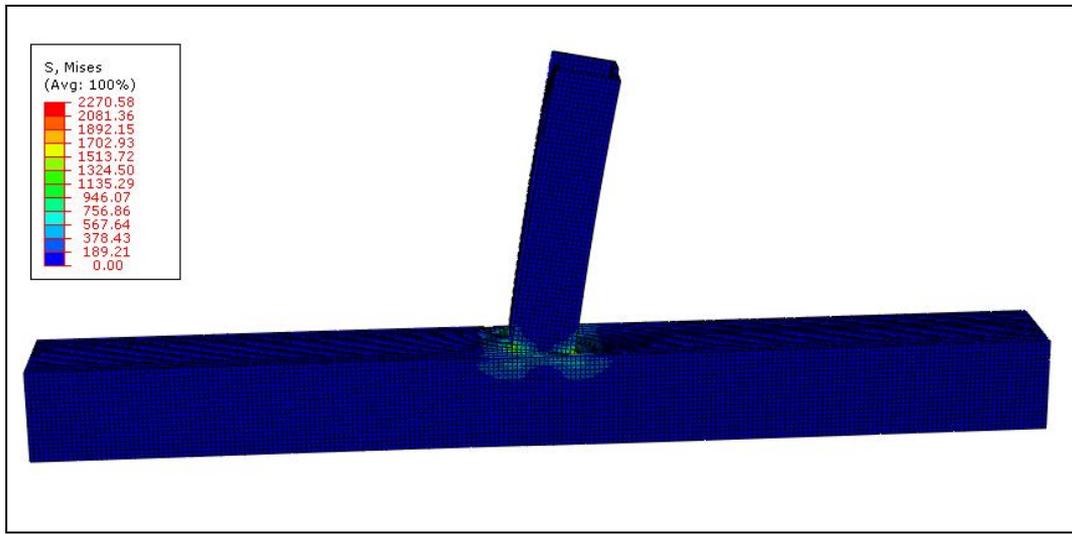


Figura 42 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento na junta em T – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

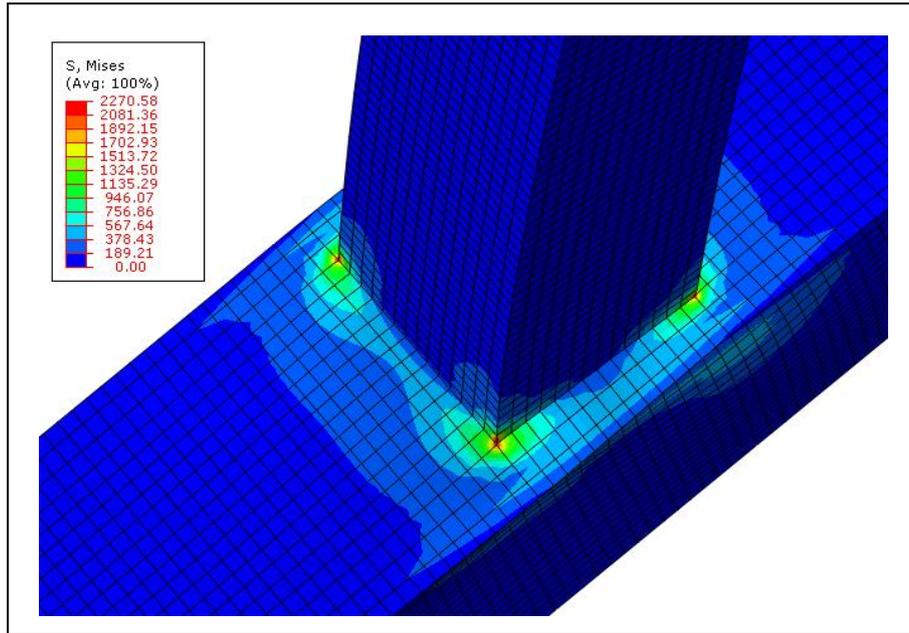


Figura 43 – Pormenor da zona de concentração de tensões – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

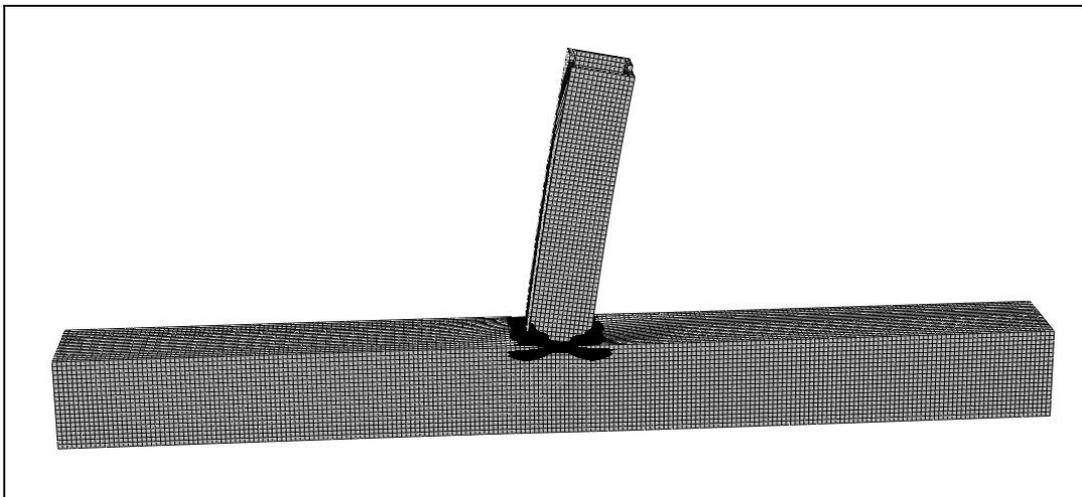


Figura 44 – Representação do modelo completo, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material representada a cor preta – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

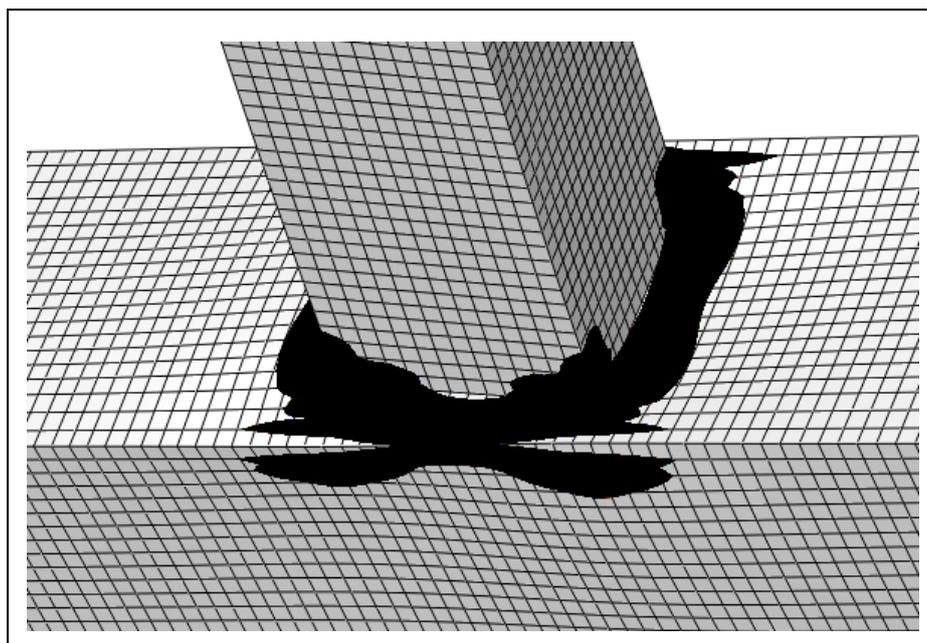


Figura 45 – Pormenor da zona de concentração de tensões com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – Situação 1a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Através da análise das figuras anteriores verifica-se existir na zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal uma elevada concentração de tensões, onde a tensão de cedência é largamente excedida. Nestas condições o material entrou em cedência e plastificou, tendo entrado no regime plástico. Esta situação não é favorável, pois como as ligações numa estrutura de veículos pesados de passageiros estão sujeitas a cargas dinâmicas, a presença de um ponto onde seja atingida a tensão de cedência leva a que se inicie uma fenda que se irá propagar para o resto da ligação, acabando por a fragilizar (e originar a criação de rótulas plásticas). Este fenómeno denomina-se por fadiga oligocíclica, isto é, a tensão instalada é muito superior à tensão de cedência do material, o que faz com que à medida que cada ciclo passe, a deformação plástica vai sendo acumulada, levando ao aparecimento do fenómeno de rotura por fadiga com baixo número de ciclos.

O material constituinte deve-se apresentar num estado pouco encruado e possuir uma tensão de rotura significativamente maior que a tensão de cedência, bem como uma grande deformação após rotura, para quando uma zona entrar em cedência, encruar, aumentar o esforço resistente e transferir a deformação para uma secção adjacente, evitando-se assim a formação de um mecanismo no modo de rotura da estrutura [3].

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Pode-se concluir então que o Eurocódigo 3 preconiza para esta ligação, valores de carga a aplicar para estados limites últimos, em que a tensão de cedência do material é superada em muito.

4.2.1.2. Propostas de melhoria construtiva

As melhorias nas ligações que se irão propor devem ser estudadas de modo a que num projecto de um veículo pesado de passageiros, estas cumpram com as dimensões intrínsecas interiores e exteriores aplicáveis (como por exemplo, dimensões ergonómicas, aparelhos de ar condicionado, vidros, etc.).

Aplicaram-se nesta ligação dois tipos de reforços, um em forma de cunha e outro com raio concordante tendo-se estudado a variação do comprimento do reforço em função da largura do tubo secundário e verificado os resultados ao nível das tensões instaladas, tendo estas sido comparadas com a tensão de cedência do material constituinte. Obteve-se o ganho obtido entre as tensões máximas instaladas nos modelos com a tensão máxima obtida no modelo original sem aplicação de reforços.

4.2.1.2.1. Caso 1 (reforço com $h=b/2$)

Para um comprimento de reforço (h) igual a 20 mm, em que é metade do valor da largura do tubo secundário (b), obtiveram-se os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

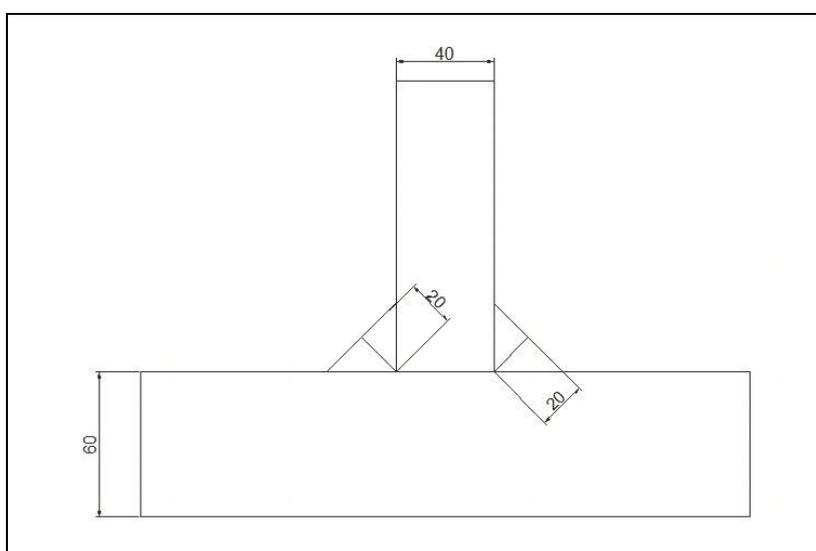


Figura 46 – Pormenor geométrico para um reforço de comprimento de 20 mm, usado junto à zona de ligação tubo principal/tubo secundário

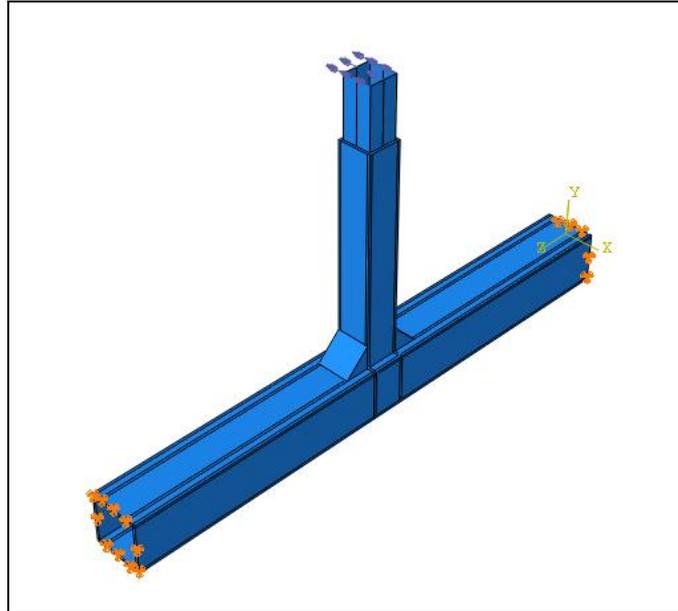


Figura 47 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=b/2$ – Situação 1b

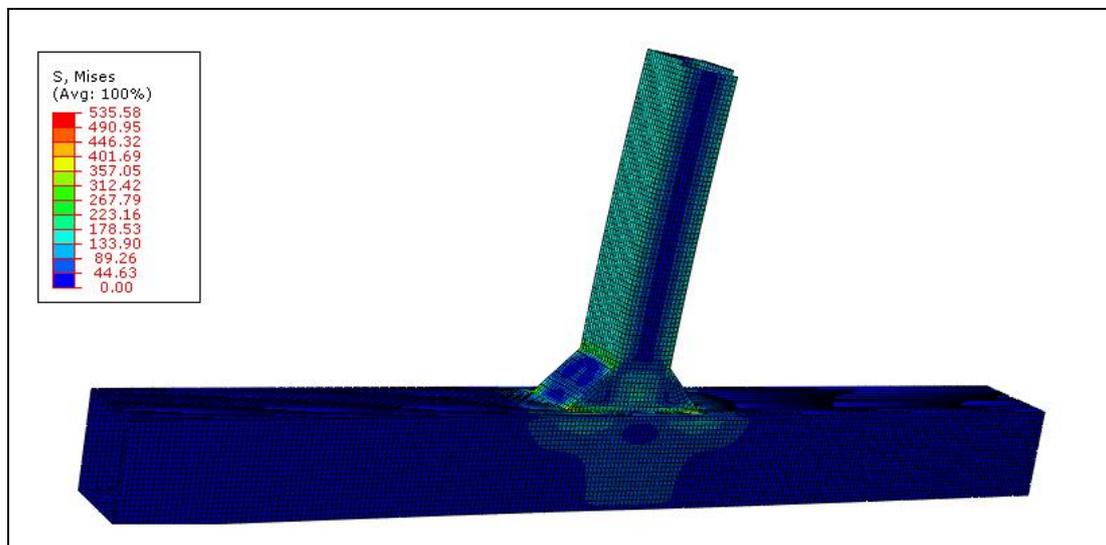


Figura 48 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=b/2$ – Situação 1b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

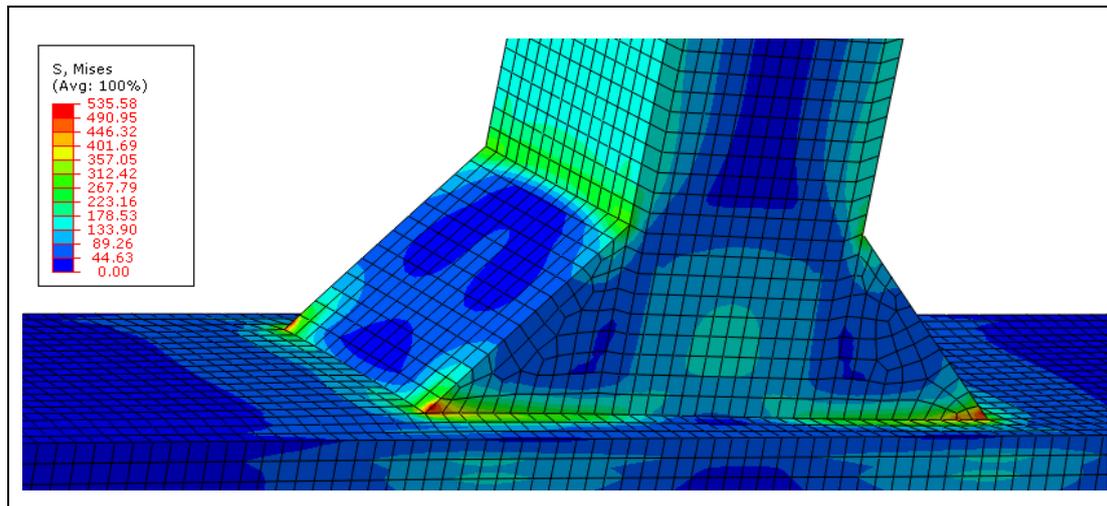


Figura 49 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=b/2$ – Situação 1b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que a zona de concentração de tensões encontra-se na zona inferior do reforço entre o tubo secundário e o tubo principal. No entanto os valores das tensões instaladas superam o valor da tensão de cedência do material, devido à variação de geometria e devido ao factor K_t (concentração de tensões) ser elevado. Poder-se-ia aplicar um cordão de soldadura de modo a que as tensões máximas instaladas na ligação não excedessem a tensão de cedência do material.

4.2.1.2.2. Caso 1 (reforço com $h=b$)

Para um comprimento de reforço (h) igual a 40 mm, em que é igual à largura do tubo secundário (b), obtiveram-se os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação.

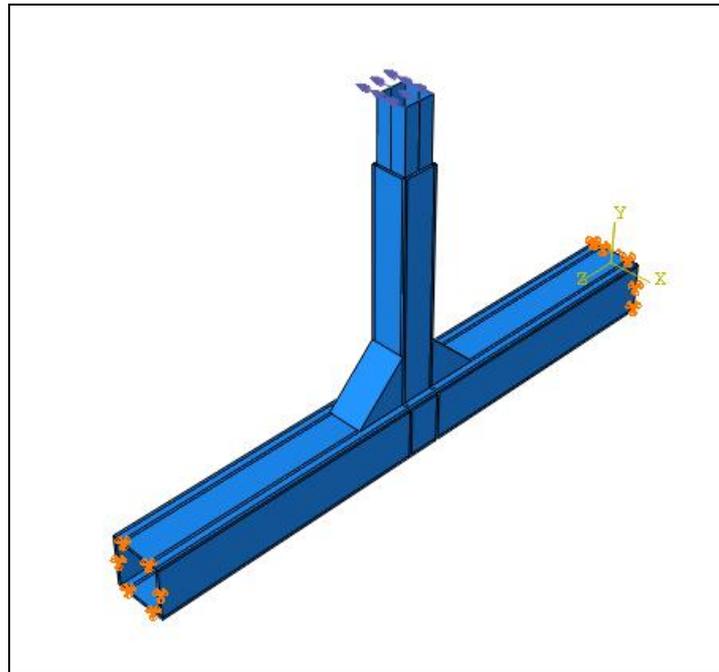


Figura 50 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=b$ – Situação 1c

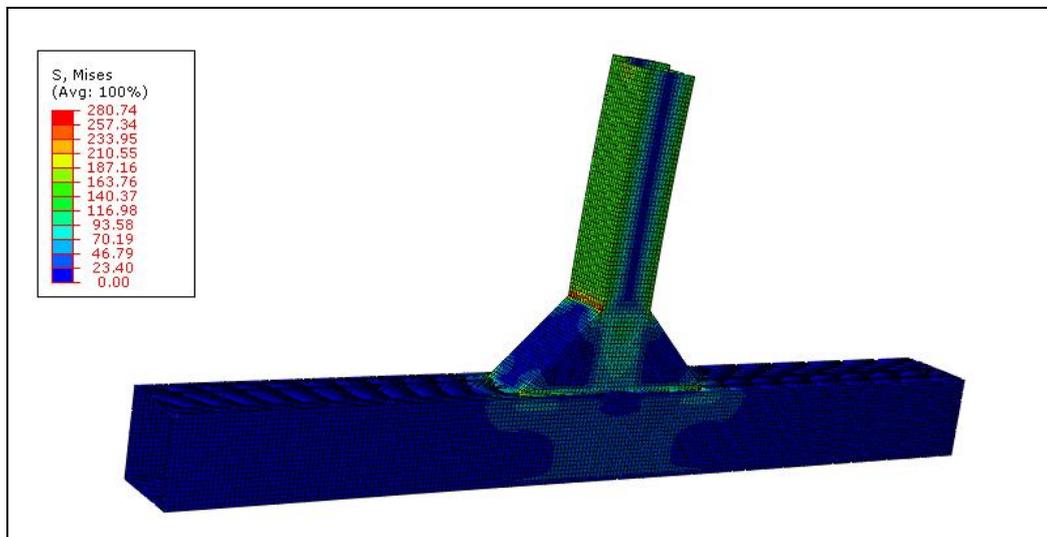


Figura 51 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=b$ – Situação 1c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

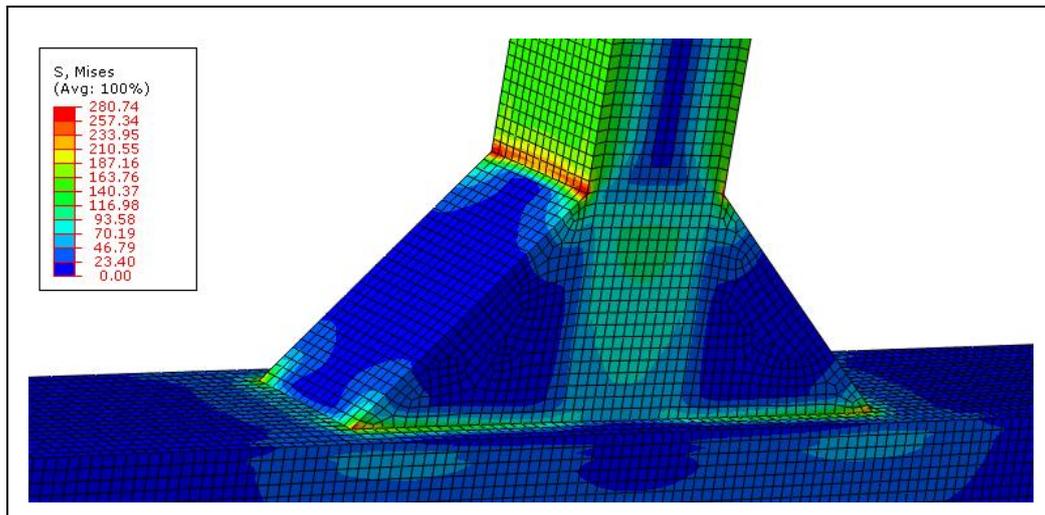


Figura 52 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=b$ – Situação 1c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Pela análise das figuras anteriores, verifica-se que a zona de concentração de tensões passou a estar localizada na zona de ligação superior entre o reforço e o tubo secundário, tirando-se daqui a conclusão de que a ligação está bem dimensionada, não sendo por isso necessário aumentar-se o comprimento de reforço. Verifica-se igualmente que as tensões instaladas no tubo secundário se aproximam da tensão instalada para um tubo simplesmente encastrado quando sujeito ao mesmo momento flector, no entanto a tensão máxima instalada no modelo é praticamente a tensão de cedência do material constituinte.

4.2.1.2.3. Caso 1 (reforço com $h=2b$)

Para um comprimento de reforço (h) igual a 80 mm, em que é o dobro à largura do tubo secundário (b), obtiveram-se os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

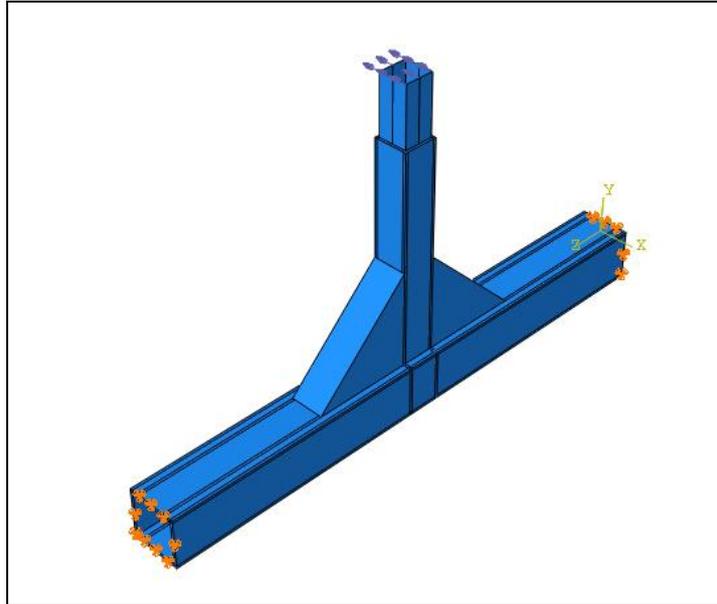


Figura 53 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação em que $h=2b$ – Situação 1d

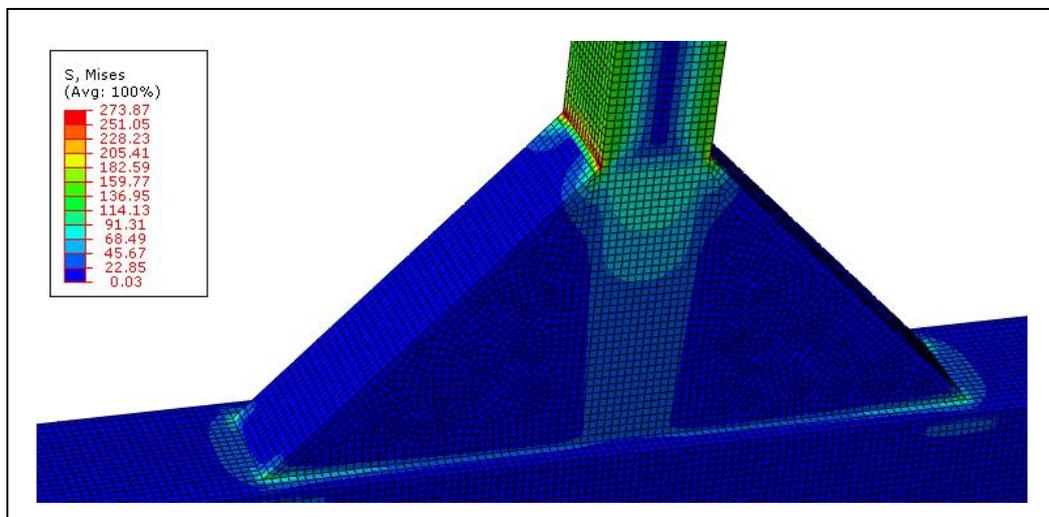


Figura 54 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo $h=2b$ – Situação 1d (Factor de escala de deformação igual a 10x)

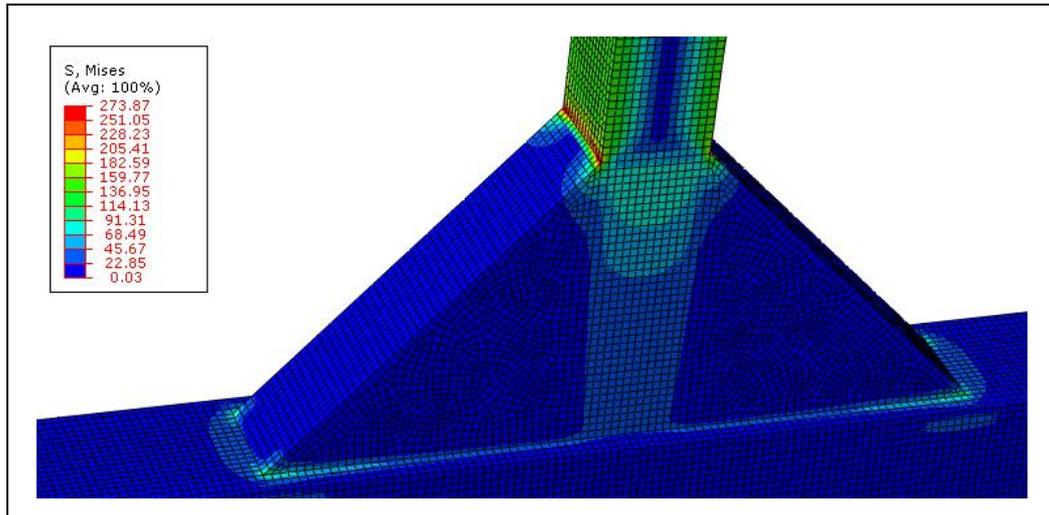


Figura 55 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com $h=2b$ – Situação 1d (Factor de escala de deformação igual a 10x)

4.2.1.2.4. Comparação de resultados

Seguidamente são apresentados dois gráficos em que se verifica uma clara tendência da diminuição da tensão máxima instalada, quer a meio da ligação quer no canto da ligação em função do aumento do comprimento de reforço e do aumento da relação comprimento de reforço/largura do tubo secundário.

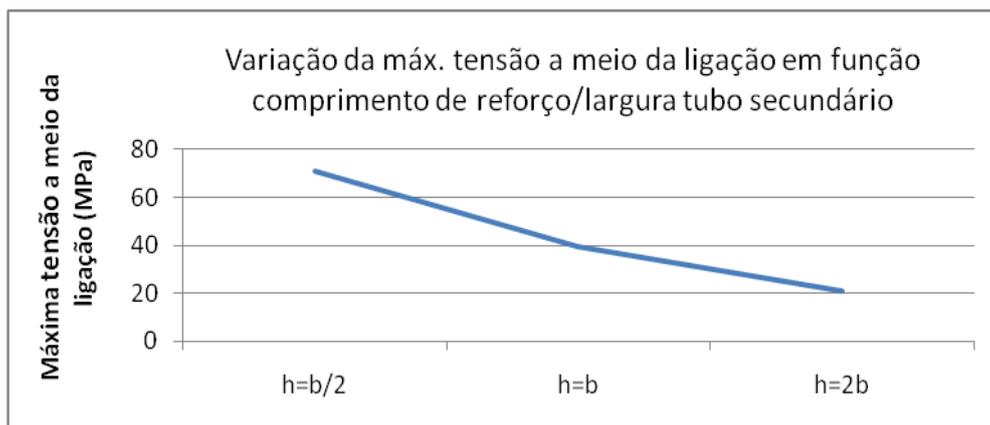


Figura 56 – Variação da máxima tensão a meio da ligação em função de comprimento de reforço/largura do tubo secundário

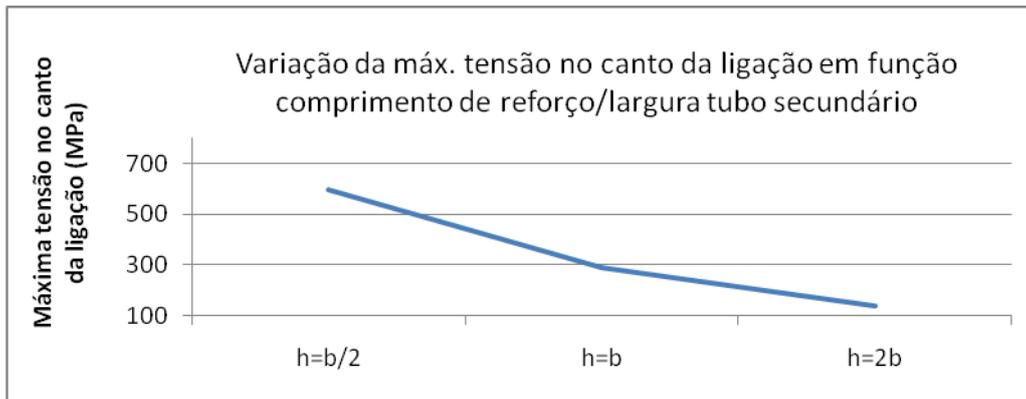


Figura 57 – Variação da máxima tensão no canto da ligação em função de comprimento de reforço/largura do tubo secundário

Como alternativa ao reforço anterior, estudaram-se reforços com raios concordantes em que se variou o comprimento de reforço em função da largura do tubo secundário. Na zona de ligação superior e inferior entre o reforço e os tubos principal e secundário, utilizaram-se pontualmente os elementos finitos do tipo *wedge* (C3D15), ou seja elementos quadráticos em forma de prisma triangular, que se ajustam a situações envolvendo raios concordantes.

4.2.1.2.5. Caso 1 (reforço em raio concordante e com comprimento de 20 mm, com $h=b/2$)

Para um reforço em raio concordante e com comprimento de 20 mm (h) em que é metade da largura do tubo secundário (b), obtiveram-se os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

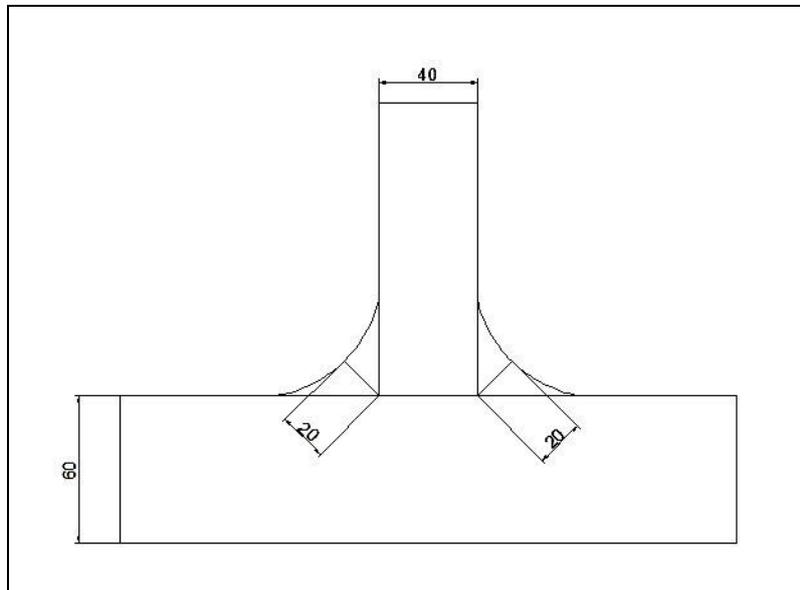


Figura 58 – Pormenor geométrico de reforço com raio concordante e com comprimento igual a 20 mm usado junto à zona de ligação tubo principal/tubo secundário

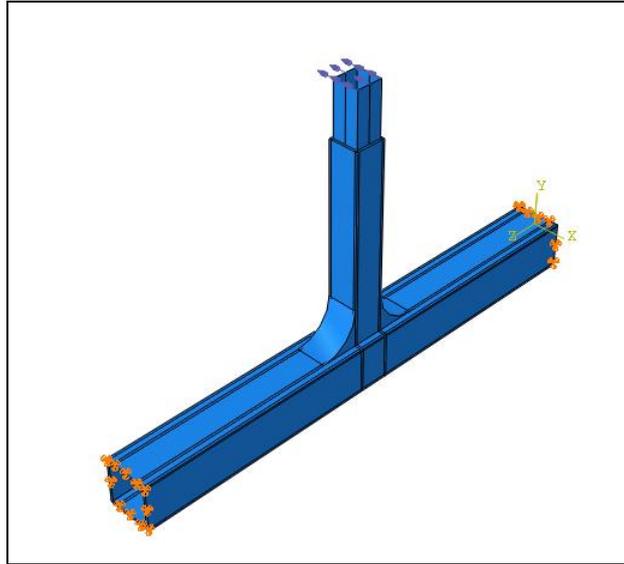


Figura 59 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e

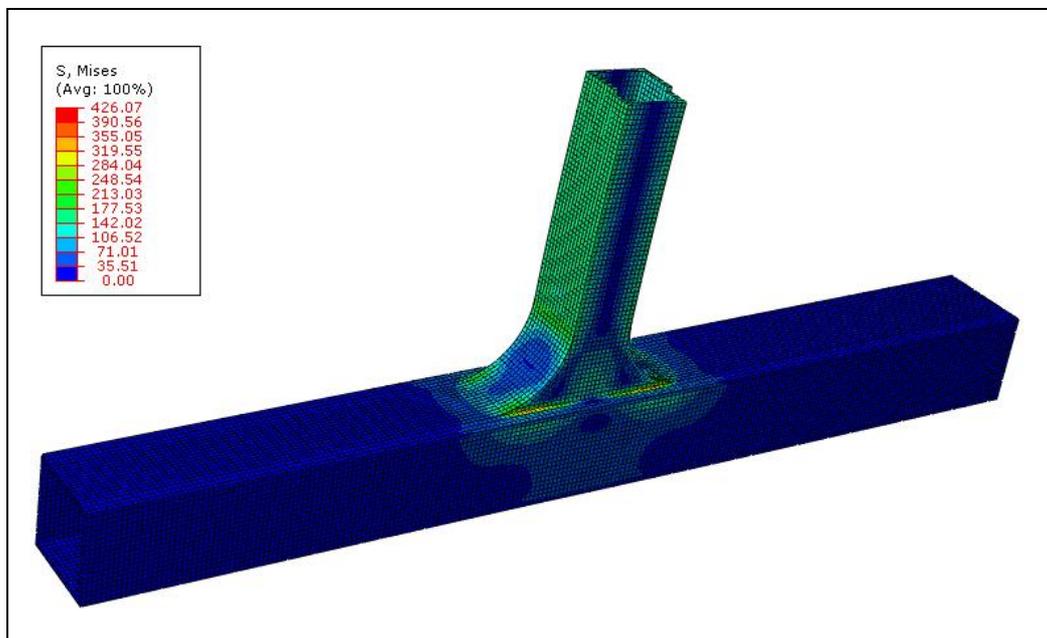


Figura 60 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e (Factor de escala de deformação igual a 10x)

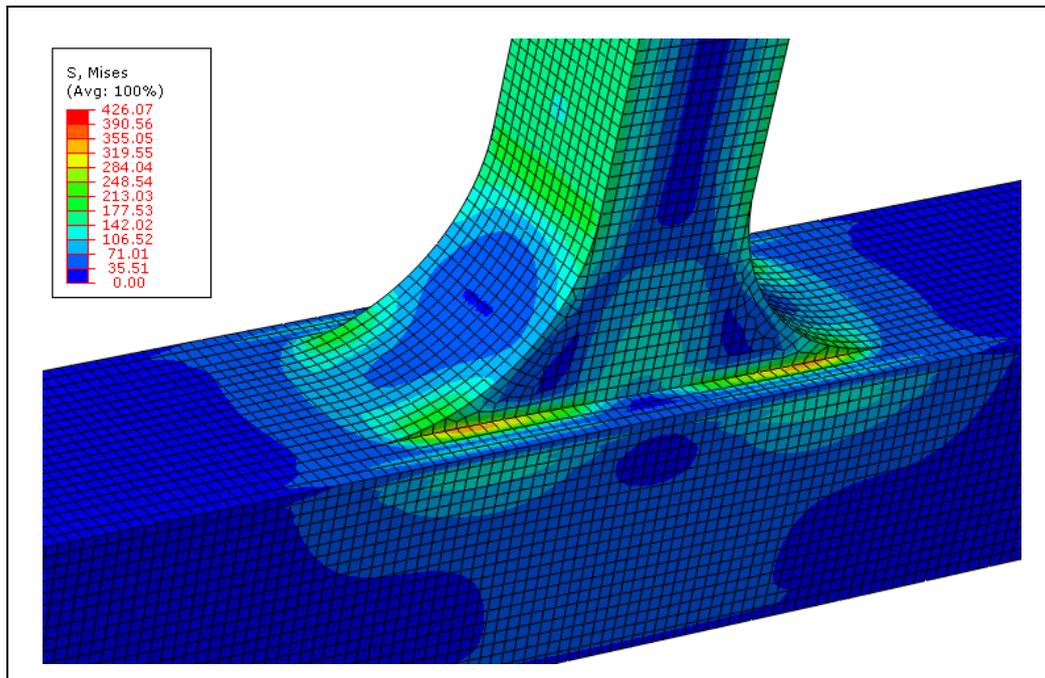


Figura 61 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio concordante e de comprimento igual à metade da largura do tubo secundário – Situação 1e (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que a zona de concentração de tensões encontra-se na zona inferior do reforço entre o tubo secundário e o tubo principal. No entanto os valores das tensões instaladas superam o valor da tensão de cedência do material, devido à variação de geometria e devido ao factor K_t (concentração de tensões) ser elevado. Foi aumentado o comprimento de reforço para que as tensões instaladas no tubo secundário se aproximem da tensão obtida para um tubo simplesmente encastrado.

4.2.1.2.6. Caso 1 (reforço em raio concordante e com comprimento de 40 mm, com $h=b$)

Para um reforço em raio concordante e com comprimento de 40 mm (h), em que é igual à largura do tubo secundário (b), obtiveram-se os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

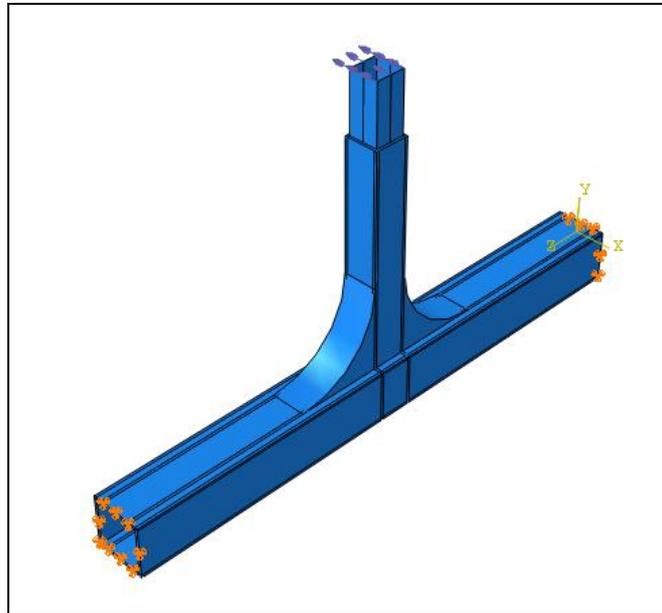


Figura 62 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f

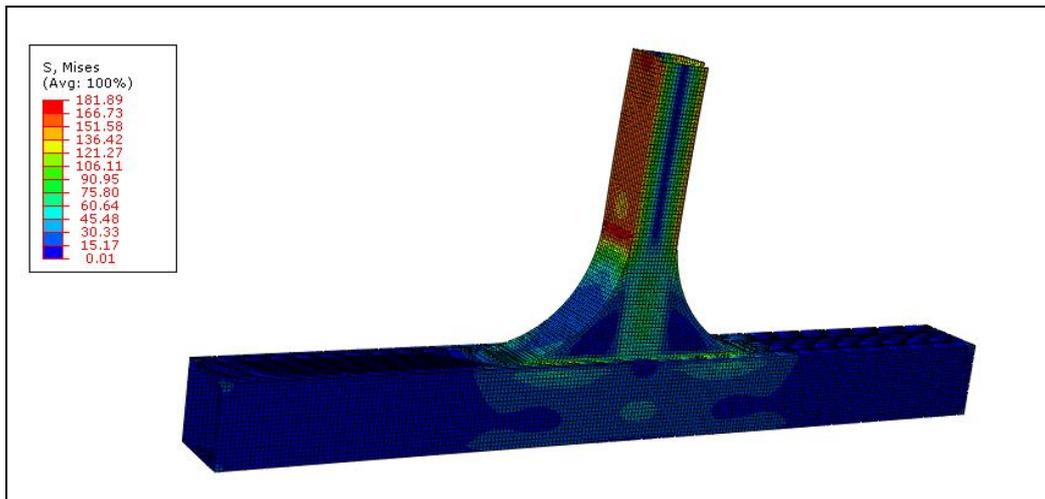


Figura 63 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f (Factor de escala de deformação igual a 10x)

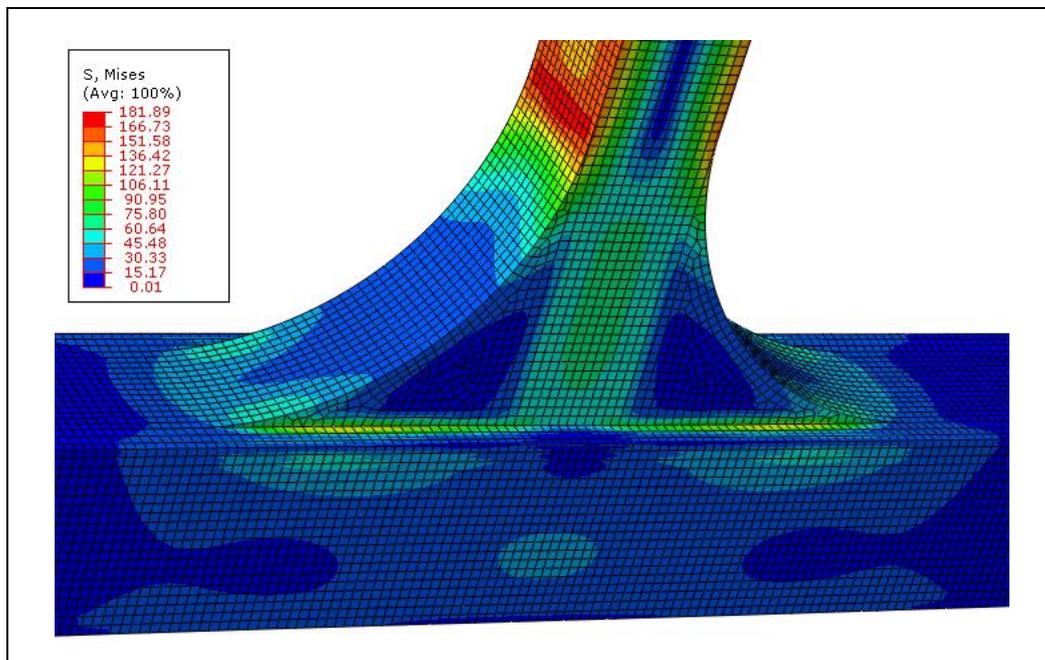


Figura 64 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1f (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Através da análise das figuras anteriores verifica-se que as tensões instaladas no tubo secundário se aproximam do valor de tensão instalada no topo superior de um tubo simplesmente encastrado quando sujeito ao mesmo momento flector, indicando assim que a ligação está bem dimensionada, não sendo por isso necessário aumentar mais o comprimento de reforço. Verifica-se igualmente que a zona de concentração de tensões passou a estar localizada entre a zona superior do reforço e o tubo secundário.

4.2.1.2.7. Caso 1 (reforço em raio concordante e com comprimento de 80 mm, com $h=2b$)

Para um reforço em raio concordante e com comprimento de 80 mm (h), em que é o dobro da largura do tubo secundário (b), foram obtidos os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

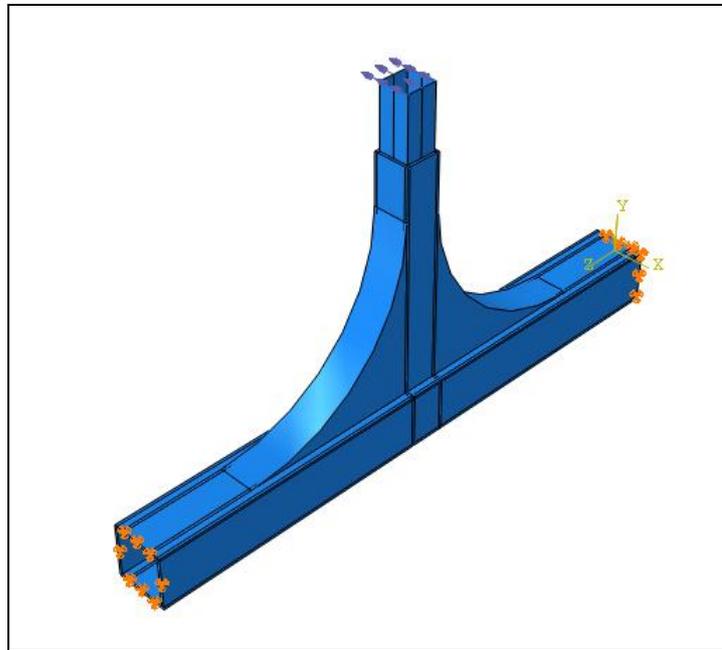


Figura 65 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g

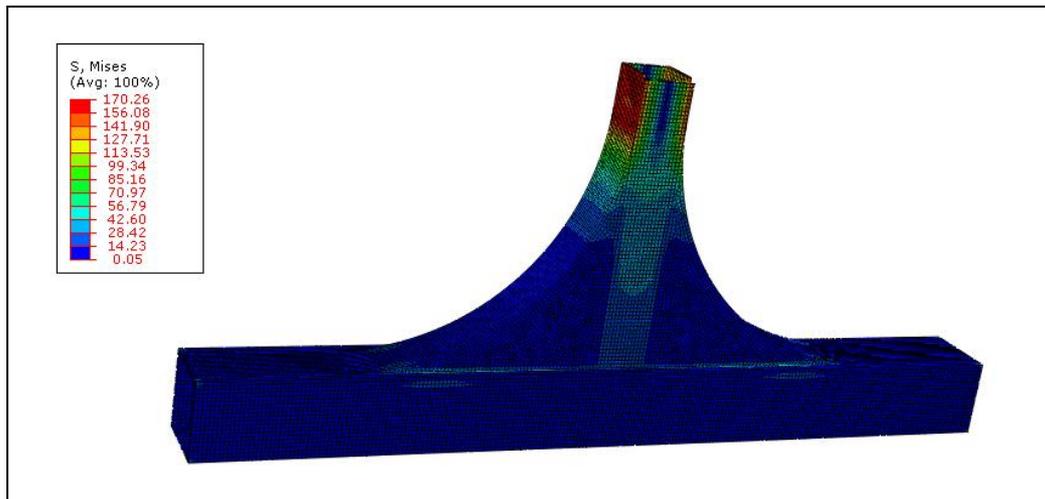


Figura 66 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g (Factor de escala de deformação igual a 10x)

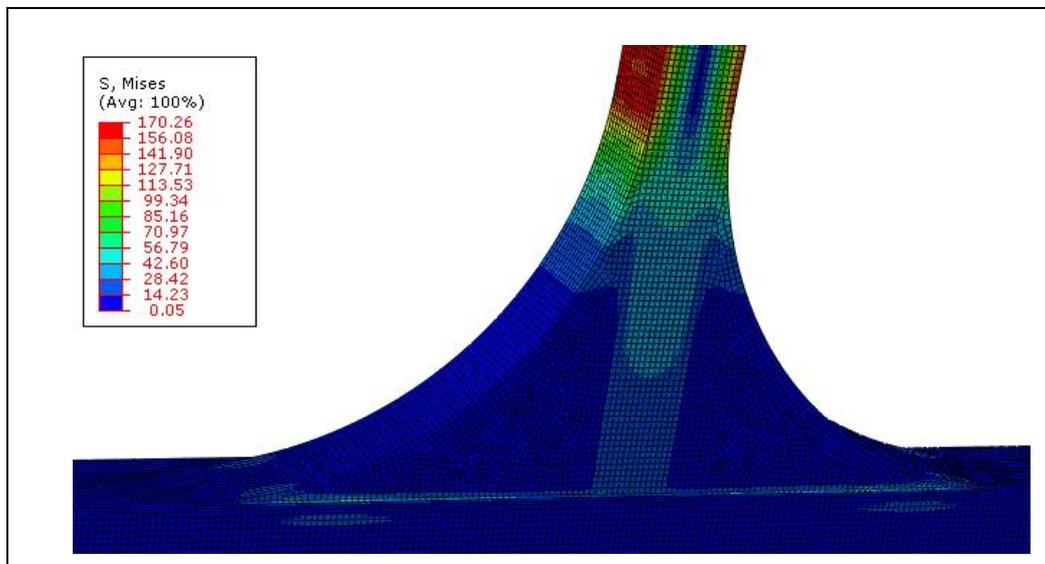


Figura 67 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, em que o reforço possui raio de concordância e de comprimento igual ao dobro da largura do tubo secundário – Situação 1g (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Tendo em conta as figuras anteriores, verifica-se que a zona de concentração de tensões se mantém na ligação superior entre o reforço e o tubo secundário, defendendo-se assim que a partir do momento em que a zona de concentração de tensões passa a localizar-se na região superior e o tubo secundário não é necessário aumentar o comprimento de reforço.

4.2.1.2.8. Caso 1 (reforço em raio concordante – segunda configuração)

Desenvolveu-se uma segunda configuração de reforço em raio concordante tendo como base o modelo anterior, em que este possui um comprimento de 100 mm na direcção do tubo principal e segundo o eixo z-z. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

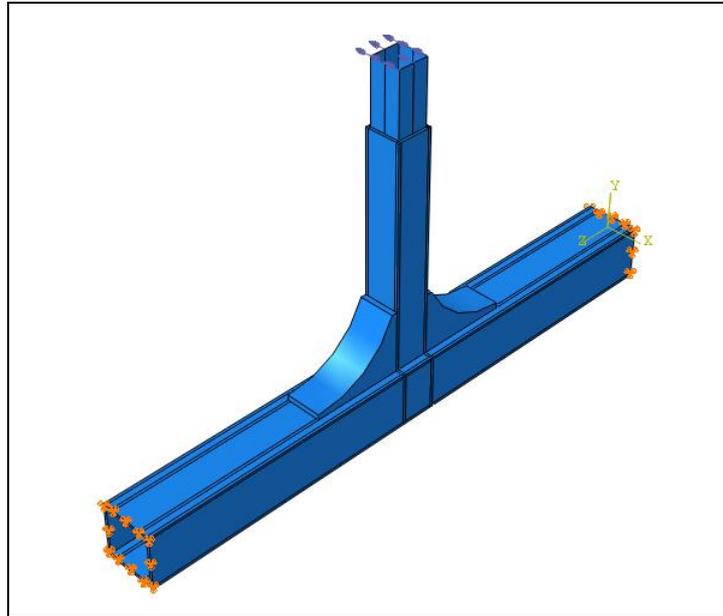


Figura 68 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira ao modelo para a situação de reforço em raio concordante (segunda configuração)

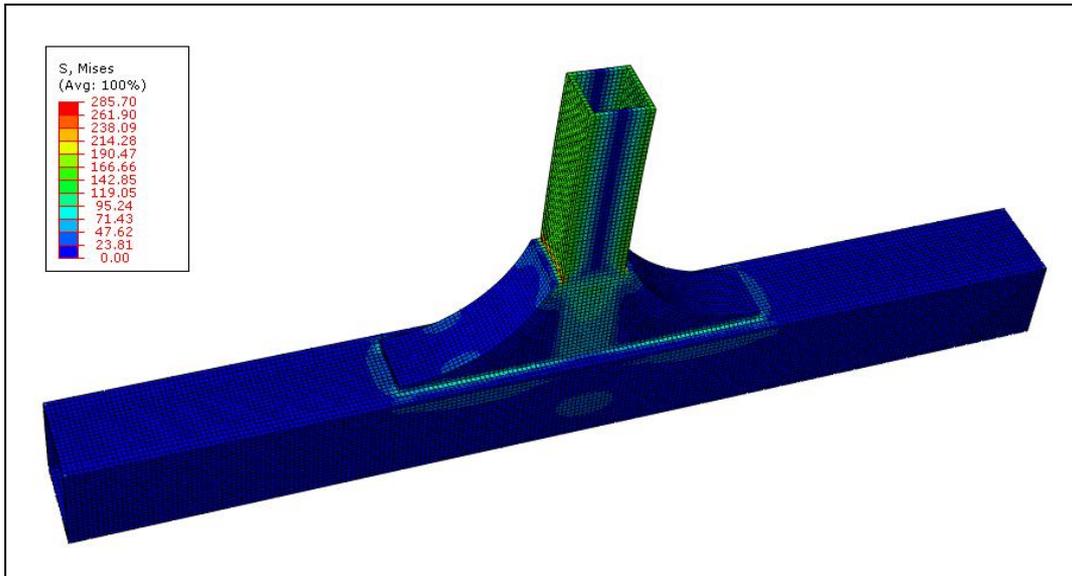


Figura 69 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x)

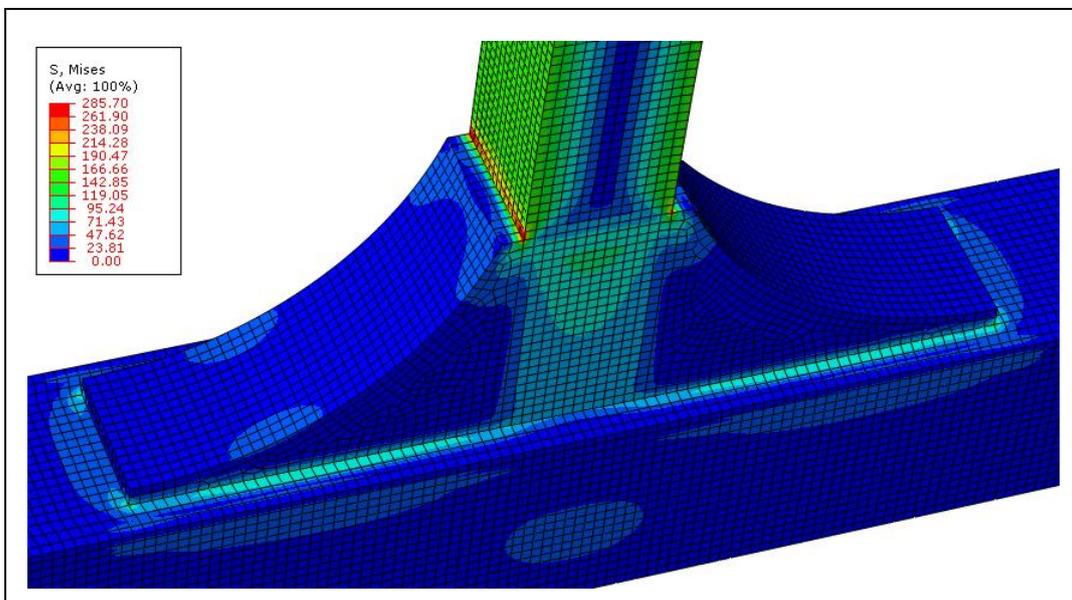


Figura 70 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal em que o reforço possui raio de concordância (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Este tipo de reforço pode-se ter em conta durante a construção dos veículos pesados de passageiros devido à sua facilidade de execução, no entanto recomenda-se a aplicação de um cordão de soldadura entre a zona superior do reforço e o tubo secundário visto esta ser uma zona de concentração de tensões onde foi ultrapassada a tensão de cedência do material. Neste modelo verifica-se que o tubo secundário está com tensão instalada de 159 MPa afastado da zona de concentração de tensões, aproximando-se assim do

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

valor de tensão instalada no topo de um tubo simplesmente encastrado e com aplicação do mesmo momento flector. Poder-se-ia testar como evoluem as tensões instaladas no modelo com a variação do raio de concordância do reforço.

4.2.1.3. Simulação numérica do caso 1 – ligação T entre tubos com larguras iguais

Numa primeira abordagem a este caso e à semelhança do estudo anterior simulou-se um tubo simples de dimensões $60 \times 40 \times 3$ [mm] de modo a poder representar o tubo secundário da ligação em T, tendo-se determinado a tensão de von Mises instalada no topo superior quando este sujeito ao momento flector actuante calculado pela expressão do esmagamento da parede lateral da corda (para $\beta = 1$), tendo o valor de 2320 N·m. Na simulação numérica foram utilizados elementos sólidos do tipo *brick* C3D20, com três elementos ao longo da espessura, tendo-se aplicado o momento flector actuante distribuído por 8 nós na extremidade de um tubo com elementos do tipo casca. Na outra extremidade do tubo simples utilizou-se um encastramento como condição fronteira.

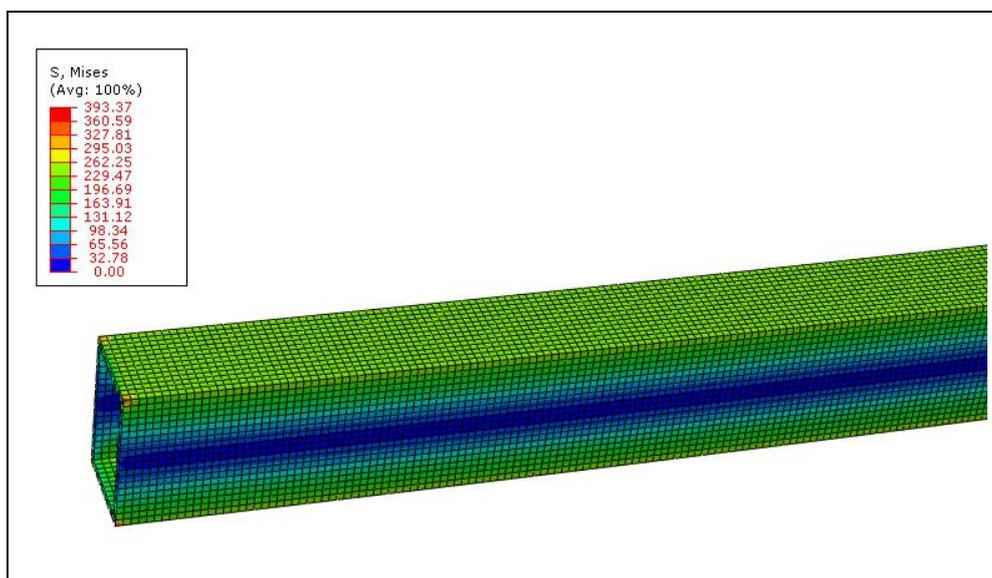


Figura 71 – Simulação de um tubo $60 \times 40 \times 3$ [mm] sujeito a um momento flector previsto pelo Eurocódigo 3 (Factor de escala de deformação igual a 10x)

A tensão instalada verificada no topo deste tubo simplesmente encastrado é 251 MPa, sendo este o valor de referência para o dimensionamento do tubo secundário desta ligação.

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Neste estudo utilizou-se a mesma junta soldada T mas com dois tubos de larguras iguais, tendo estes as seguintes dimensões: tubo principal 60×60×3 [mm] e tubo secundário 60×40×3 [mm]. Posteriormente colocaram-se reforços de forma a poder melhorar a distribuição das tensões na zona de ligação bem como diminuir as tensões máximas instaladas.

Na simulação numérica deste modelo e com o uso de reforços foram utilizados elementos sólidos *brick* C3D20 com três elementos ao longo da espessura. Aplicou-se o momento flector actuante dividido por 8 nós numa extremidade de um tubo com elementos do tipo casca, tendo o valor total de 2320 N·m. Este valor de momento flector foi calculado através da expressão para o esmagamento da parede lateral da corda (tabela 6) visto que o valor de β é igual a 1 (na situação de tubos de larguras iguais). Aplicaram-se dois encastramentos no tubo principal como condições fronteira.

Tabela 20 – Parâmetros gerais para o Caso 1 – Situação de Tubos de larguras iguais

Parâmetros gerais - Caso 1 - Eurocódigo 3 – (tubos de larguras iguais)	
t_0	3 mm
b_0	60 mm
b_1	60 mm
β	1
f_{y0}	275 MPa
γ_{M5}	1

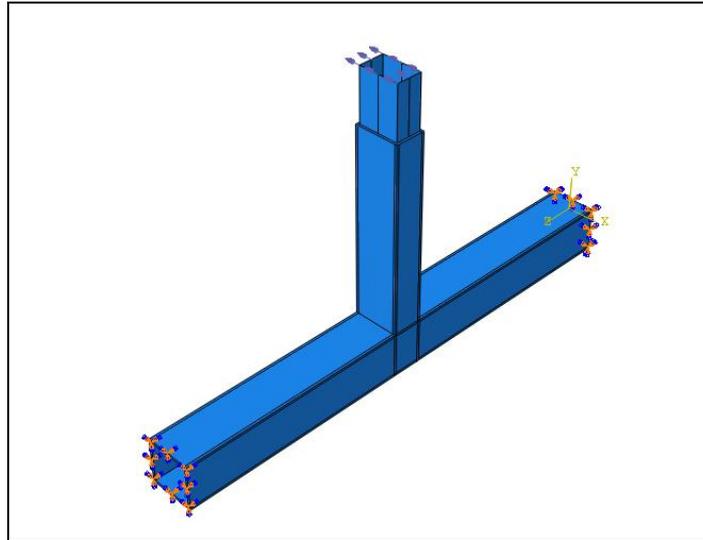


Figura 72 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T (para tubos com larguras iguais) – Situação 1h

4.2.1.3.1. Apresentação de resultados e identificação de zonas críticas

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas para o caso da ligação com tubos de larguras iguais e sujeitas a um momento flector actuante que é cerca de três vezes superior ao momento flector actuante aplicado para o caso de ligação entre tubos de larguras diferentes.

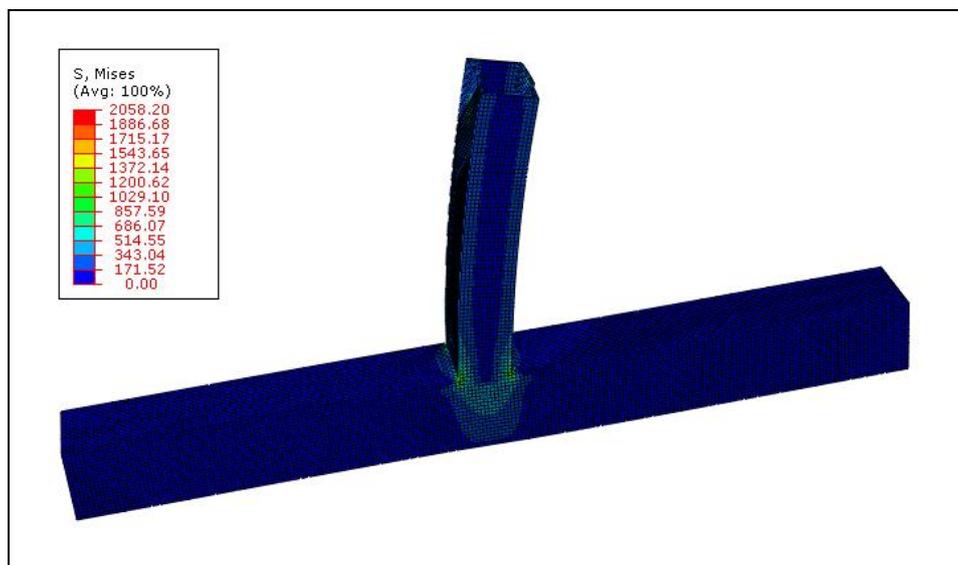


Figura 73 – Malha de elementos finitos com aplicação do momento na junta soldada em T - (Factor de escala de deformação igual a 10x) – Situação 1h

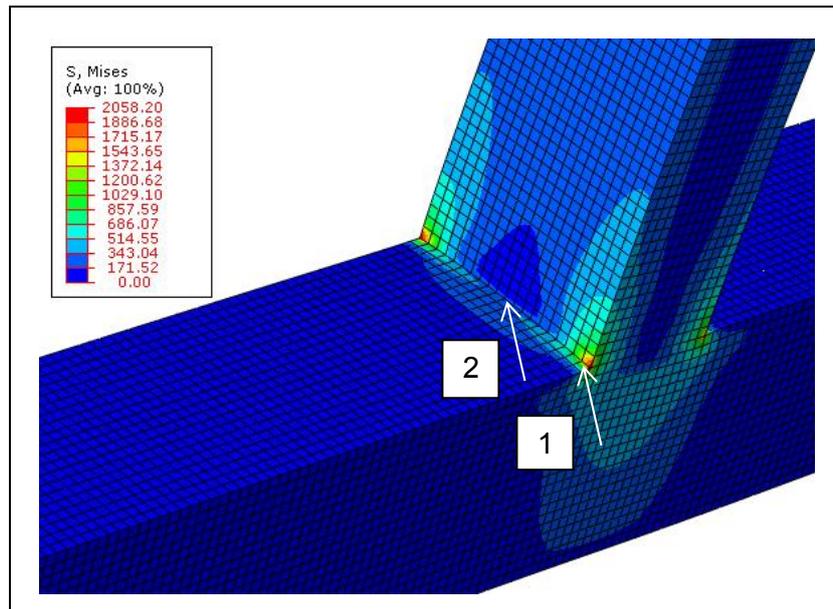


Figura 74 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com tubos de larguras iguais – Situação 1h (Factor de escala de deformação igual a 10x)

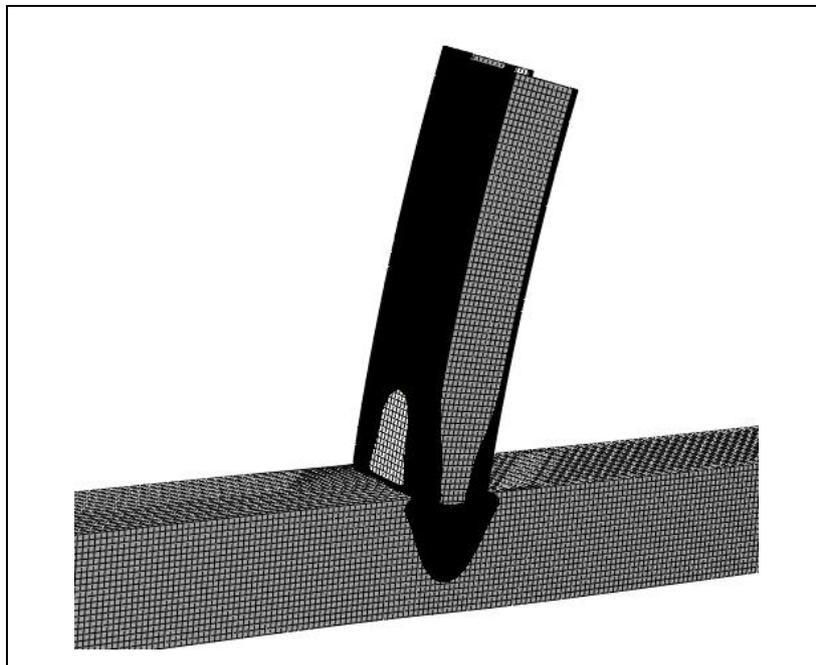


Figura 75 – Pormenor da Zona de concentração de tensões, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – Situação 1h (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Através da análise dos resultados obtidos para o modelo completo e no pormenor da zona de ligação verifica-se uma elevada concentração de tensões junto aos cantos da ligação como sucedia com a ligação entre tubos com larguras diferentes. No entanto, com este tipo de ligação consegue-se uma boa transmissão de esforços (normais e momentos flectores) do tubo secundário para o tubo principal, sendo por isso uma

ligação preferível para a construção de veículos pesados de passageiros. Verifica-se que para um momento três vezes superior ao aplicado no caso da ligação entre tubos de larguras diferentes, os valores de tensão instalada na ligação entre tubos de larguras iguais são praticamente os mesmos comparativamente à ligação entre tubos de larguras diferentes. Daqui se pode concluir que a ligação entre tubos de larguras iguais é três vezes mais resistente do que a ligação entre tubos de larguras substancialmente diferentes e que aumentando o factor β (relação entre a largura do tubo secundário e o tubo principal), a ligação torna-se mais substancialmente mais resistente.

4.2.1.3.2. Propostas de melhoria construtiva

Para este tipo de ligação optou-se pela colocação de um reforço em forma de cunha com um comprimento igual à largura do tubo secundário. Nos modelos anteriores verificou-se que com um comprimento de reforço igual à largura do tubo secundário se obtém resultados razoáveis, daí a escolha deste comprimento de reforço. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação encontram-se representados nas figuras seguintes.

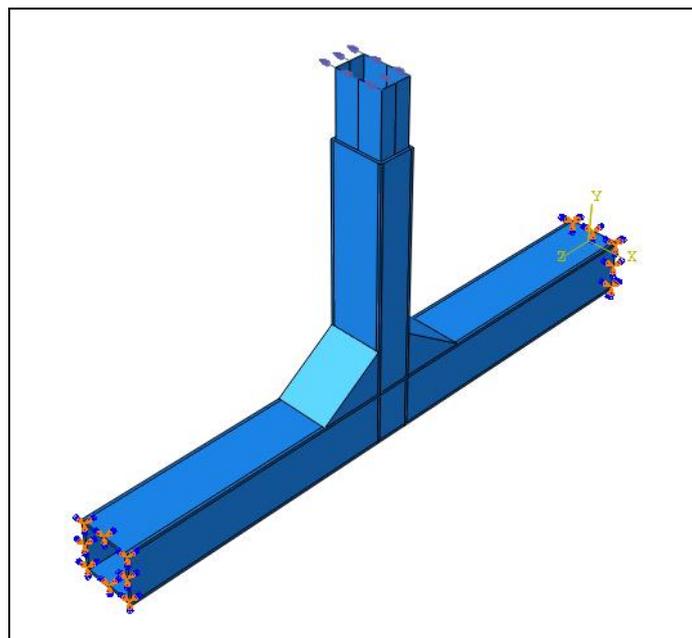


Figura 76 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1i

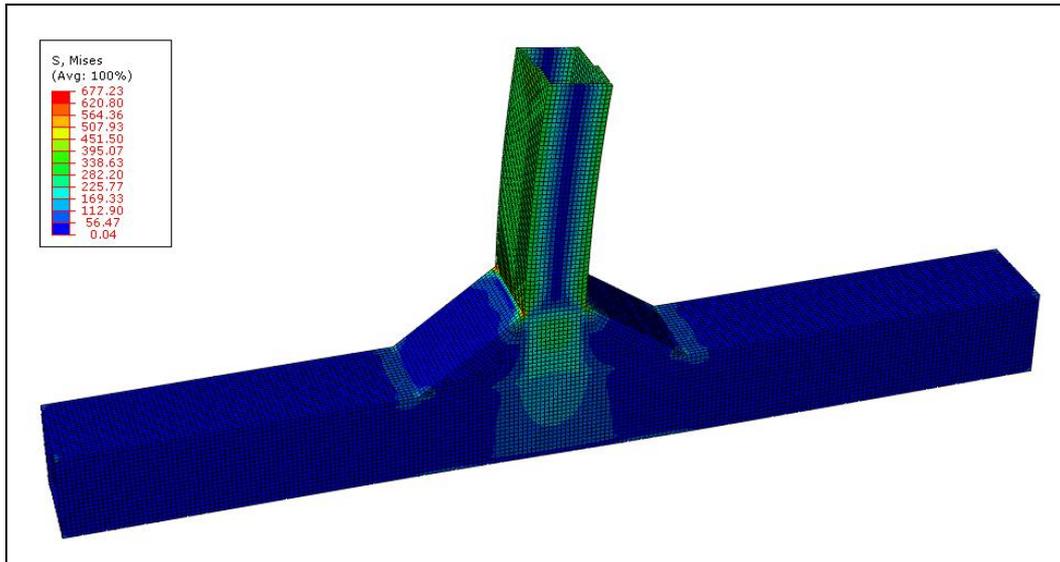


Figura 77 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, em que o comprimento de reforço é igual à largura do tubo secundário – Situação 1i (Factor de escala de deformação igual a 10x)

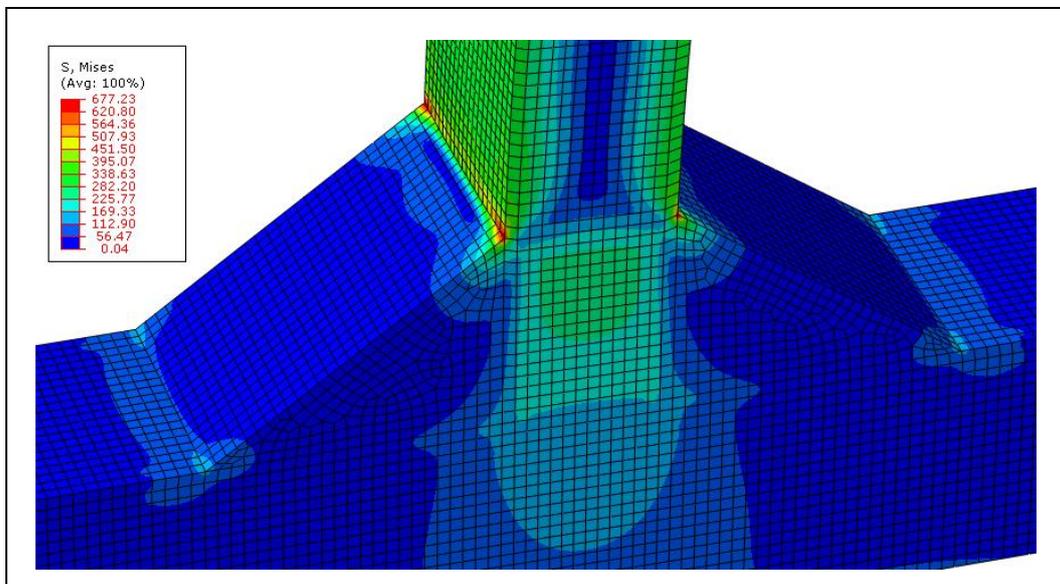


Figura 78 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com um comprimento de reforço igual à largura do tubo secundário – Situação 1i (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Pela análise das figuras anteriores verifica-se que a ligação com este tipo de reforço, faz com que as tensões instaladas no tubo secundário se aproximem do valor de tensão instalada no topo superior de um tubo simplesmente encastrado e sujeito ao mesmo momento flector aplicado.

Em alternativa ao reforço anterior optou-se pela colocação de um reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário. Na zona de ligação

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

superior e inferior entre o reforço e os tubos secundário e principal, utilizaram-se pontualmente elementos finitos do tipo *wedge* (C3D15), tendo-se obtido os seguintes resultados ao nível das tensões instaladas na ligação, de acordo com as figuras seguintes.

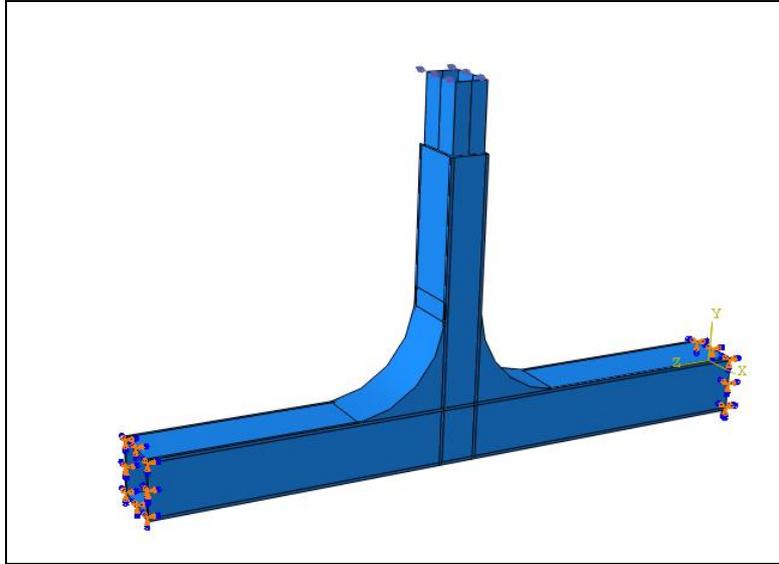


Figura 79 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j

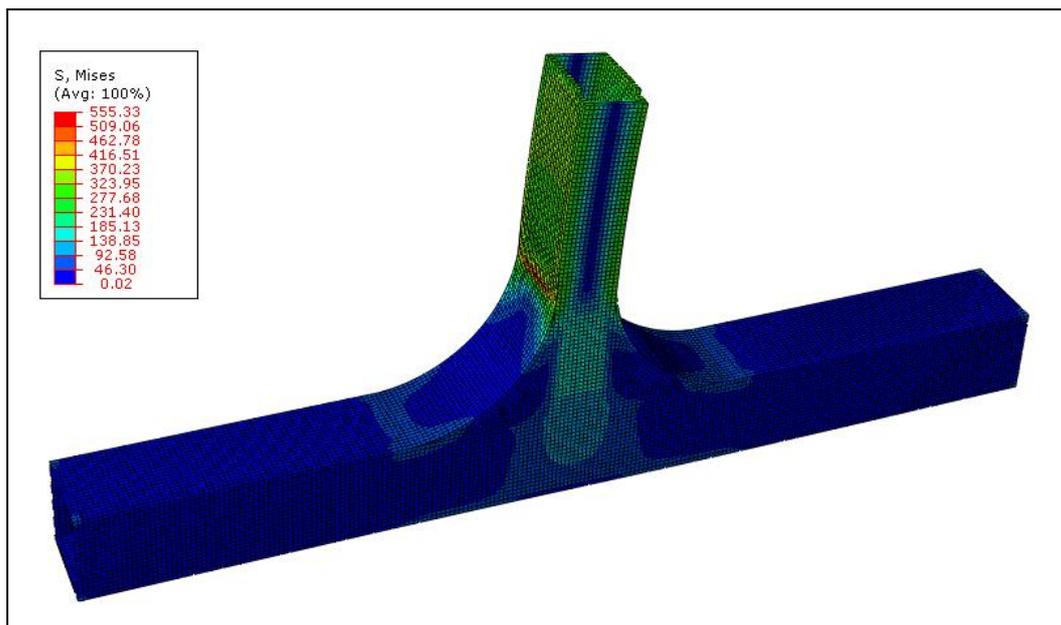


Figura 80 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j (Factor de escala de deformação igual a 10x)

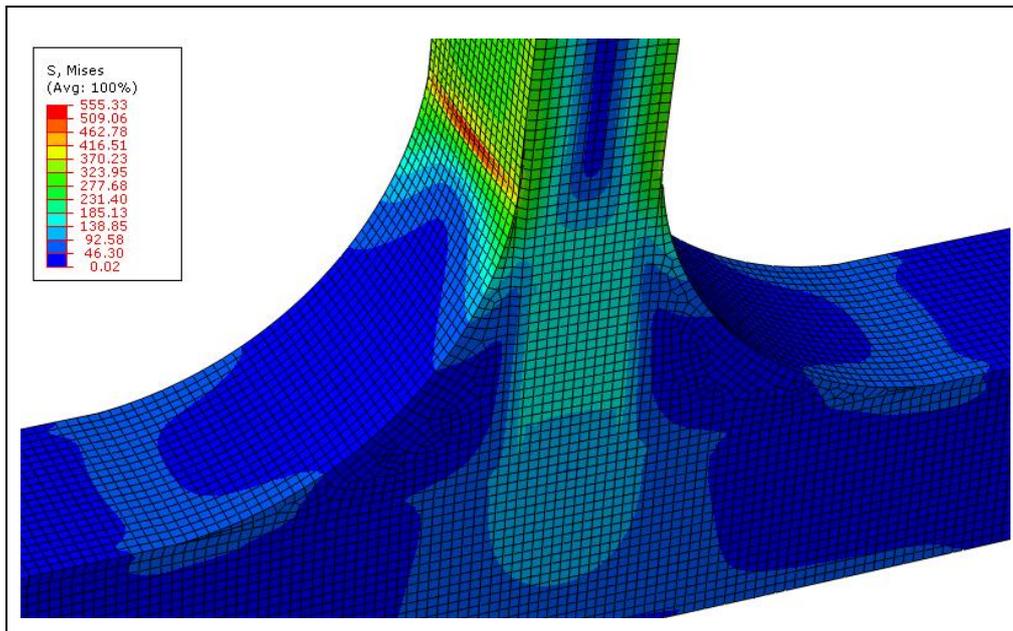


Figura 81 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com reforço em raio concordante e de comprimento igual à largura do tubo secundário – Situação 1j (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Através da análise das figuras anteriores verifica-se que as tensões instaladas no tubo secundário (afastado da zona de concentração de tensões) se aproximam do valor de tensão instalada para um tubo simplesmente encastrado 251 MPa, no entanto os valores máximos de tensão instaladas no modelo superam a tensão de cedência do material, devendo-se por isso variar os parâmetros geométricos inerentes à ligação e parâmetros de resistência por forma a não ser ultrapassada essa tensão.

À semelhança do caso anterior utilizou-se um reforço mas em forma de raio concordante (com uma segunda configuração) tendo um comprimento de 100 mm na direcção do tubo principal (segundo o eixo z-z). Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

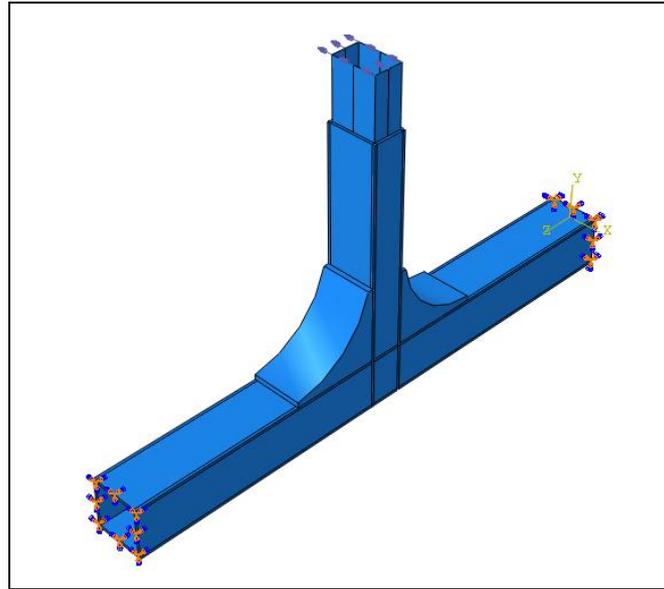


Figura 82 – Aplicação de momento flector no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira a uma junta soldada em T, com reforço em raio concordante (segunda configuração)

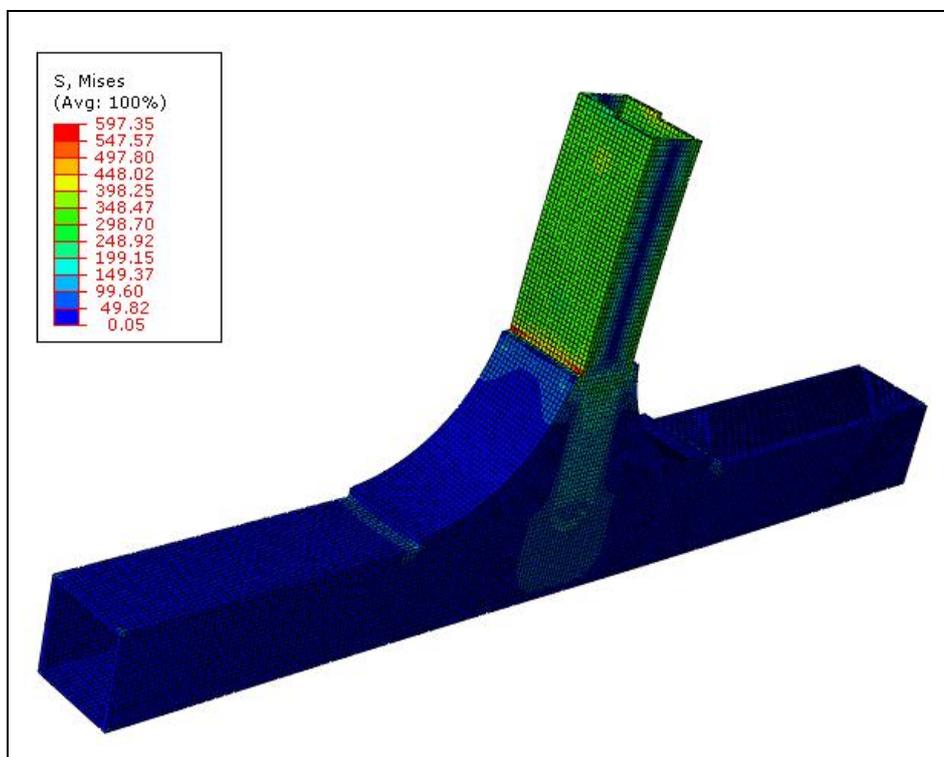


Figura 83 – Malha de elementos finitos com aplicação de momento no modelo em estudo, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x)

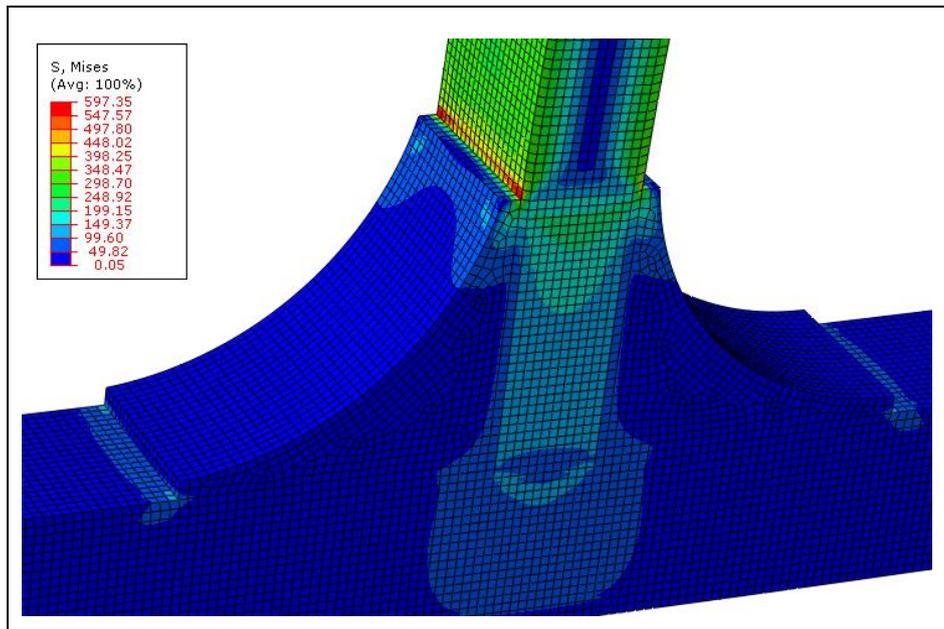


Figura 84 – Pormenor da zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, com reforço em raio concordante (segunda configuração) - (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Da análise das figuras anteriores verifica-se que com a aplicação deste reforço, o valor de tensão instalada no tubo secundário é 291 MPa afastado da zona de concentração de tensões, aproximando-se assim da tensão instalada no topo superior de um tubo simplesmente encastrado e sujeito ao mesmo momento flector aplicado. Como já referido, este tipo de reforço pode ser utilizado na construção de veículos pesados de passageiros, no entanto deve-se recomendar a utilização de cordões de soldadura por forma a baixar as tensões instaladas de modo a não ser ultrapassada a tensão de cedência do material constituinte. Deve-se variar os parâmetros geométricos da ligação ou mesmo alterar o tipo de material constituinte, optando por exemplo, na aplicação de um aço com elevada resistência (S355 J2H).

4.2.1.4. Apresentação de resultados e conclusões

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos para as situações em que se aplicaram reforços em forma de cunha e raios concordantes nas ligações entre tubos de larguras diferentes e com larguras iguais.

Tabela 21 – Resultados obtidos para o modelo original – Tubos de larguras diferentes

Modelo original		Tensões obtidas (MPa)	Relação com tensão de cedência (275 MPa) (%)
1a	Valor máx. tensão a meio	223,49	81%
1a	Valor máx. tensão no canto	2263,4	823%

Tabela 22 – Resultados obtidos para a solução de colocação de reforço em forma de cunha – Tubos de larguras diferentes

Comprimento de reforço vs função do tubo secundário		Tensões obtidas (MPa)	Relação com tensão de cedência (%)	Ganho $\frac{\sigma_{modelo}}{\sigma_{obtida}}$
h=b/2	Tensão de cedência	275		
1b	Valor máx. tensão a meio	71,15	26%	3,14
1b	Valor máx. tensão no canto	596,26	217%	3,80
h=b				
1c	Valor máx. tensão a meio	39,34	14%	5,68
1c	Valor máx. tensão no canto	290,94	106%	7,78
1c	Valor máx. na zona de ligação (superior)	263,73	96%	8,58
1c	Valor máx. na zona de ligação (inferior)	290,94	106%	7,78
h=2b				
1d	Valor máx. tensão a meio	21,08	8%	10,58
1d	Valor máx. tensão no canto	135,38	49%	16,72
1d	Valor máx. na zona de ligação (superior)	253,02	92%	8,95
1d	Valor máx. na zona de ligação (inferior)	135,38	49%	16,72

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

**Tabela 23 – Resultados obtidos para a solução de colocação de reforço com raio concordante
– Tubos de larguras diferentes**

Com raios concordantes		Tensões obtidas (MPa)	Relação com tensão de cedência (%)	Ganho $\frac{\sigma_{\text{modelo}}}{\sigma_{\text{obtida}}}$
Comprimento de reforço de 20 mm	Tensão de cedência	275		
1e	Valor máx. tensão a meio	98,46	36%	2,27
1e	Valor máx. tensão no canto	126,07	46%	17,95
1e	Valor máx. na zona de ligação (superior)	201,88	73%	11,21
1e	Valor máx. na zona de ligação (inferior)	312	114%	7,25
Comprimento de reforço de 40 mm				
1f	Valor máx. tensão a meio	39,58	14%	5,63
1f	Valor máx. tensão no canto	29,6	11%	...
1f	Valor máx. na zona de ligação (superior)	174,5	64%	12,97
1f	Valor máx. na zona de ligação (inferior)	114,34	42%	19,80
Comprimento de reforço de 80 mm				
1g	Valor máx. tensão a meio	9,21	3%	24,23
1g	Valor máx. tensão no canto	7,32	3%	...
1g	Valor máx. na zona de ligação (superior)	166,53	61%	13,59
1g	Valor máx. na zona de ligação (inferior)	30,58	11%	...

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 24 – Resultados obtidos para o modelo original – Tubos de larguras iguais

Modelo Original		Tensões obtidas (MPa)	Relação com tensão de cedência (%)
	Tensão de cedência	275	
1h	Valor máx. tensão a meio ligação (1)	160,57	58,40%
1h	Valor máx. tensão no canto da ligação (2)	2026,56	736,90%

Tabela 25 – Resultados obtidos com aplicação de reforços – Tubos de larguras iguais

Modelo com reforço em cunha		Tensões obtidas (MPa)	Relação com tensão de cedência (%)	Ganho $\frac{\sigma_{modelo}}{\sigma_{obtida}}$
	Tensão de cedência	275		
1i	Valor máx. tensão a meio da ligação	58,86	21%	2,73
1i	Valor máx. tensão no canto da ligação	143,32	52%	...
1i	Valor máx. na zona de ligação (superior)	526,14	191%	3,85
Modelo com reforço de raio concordante				
1j	Valor máx. tensão a meio da ligação	51,56	19%	3,11
1j	Valor máx. tensão no canto da ligação	49,08	18%	...
1j	Valor máx. na zona de ligação (superior)	508,97	185%	3,98

Os valores apresentados foram retirados a meio da ligação entre os perfis tubulares e num dos cantos da ligação, em alguns modelos na zona de ligação superior (entre o reforço e o tubo secundário) e na zona de ligação inferior (entre o reforço e o tubo principal).

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Testou-se a ligação em T para o caso original do Eurocódigo 3, tendo-se verificado que o valor máximo das tensões instaladas excedia largamente a tensão de cedência do material. Como o Regulamento não apresenta nenhuma solução construtiva para este caso, optou-se pela utilização de reforços em forma de cunha e estudou-se a variação do comprimento do reforço em função da largura do tubo secundário, tendo-se obtido com esta solução uma tensão instalada cerca de 17x menor que a tensão máxima no modelo original.

Com a aplicação de reforço em raio concordante verificou-se existir uma diminuição da tensão máxima instalada no canto e a meio da ligação em relação à ligação entre os dois tubos sem reforços, tendo-se obtido uma tensão instalada cerca de 24x menor que a tensão máxima no modelo original. Verifica-se que as tensões instaladas diminuíram aproximadamente o dobro em comparação com a utilização de reforços em forma de cunha. Com esta solução obteve-se uma diminuição gradual da rigidez ao longo do comprimento do reforço.

Como conclusões a serem retiradas para o caso da ligação entre dois perfis tubulares quadrados em T com larguras iguais, podem citar-se as seguintes:

Através da análise por simulação numérica para a ligação entre tubos de larguras iguais, verificou-se existir uma boa transmissão de esforços do tubo secundário para o tubo principal. À semelhança da situação anterior colocaram-se igualmente reforços, tendo-se verificado que com a utilização de reforço em forma de cunha os valores das tensões instaladas diminuíram mas com valores superiores ao valor de tensão de cedência do material.

Com esta ligação, consegue-se obter uma resistência três vezes superior do que com a ligação de tubos de larguras diferentes, visto esta ligação estar submetida a um momento três vezes superior e originar praticamente as mesmas tensões instaladas em relação ao caso da ligação entre tubos de larguras iguais.

Na ligação com aplicação de reforço em forma em cunha e com um comprimento igual à largura do tubo secundário, verificou-se um decréscimo ao nível da tensão máxima instalada no canto e a meio da ligação em relação à ligação com tubos de diferentes larguras, tendo-se obtido para esta solução uma tensão instalada 3,85x menor do que a tensão máxima obtida no modelo original. As tensões máximas instaladas localizam-se

na região superior de ligação entre o reforço e o tubo secundário. Uma possível melhoria para esta situação, passaria por exemplo, por se reforçar a ligação por intermédio de um cordão de soldadura.

4.2.2. Simulação numérica do caso 2 – Ligação K

Para a ligação preconizada no Eurocódigo, nesta Dissertação tratada como Caso 2, o estudo ir-se-à incidir numa ligação em K, tendo-se simulado numericamente esta ligação com elementos sólidos do tipo *brick* C3D20 com oito elementos ao longo da espessura devido ao tempo computacional ser elevado do que com a utilização de tamanho de três elementos ao longo da espessura. Aplicaram-se dois encastramentos no tubo principal como condições fronteira. As dimensões dos tubos secundários 1 e 2 são, respectivamente 40x40x3 [mm] e 50x50x3 [mm] enquanto que a dimensão do tubo principal 0 é 60x60x3 [mm].

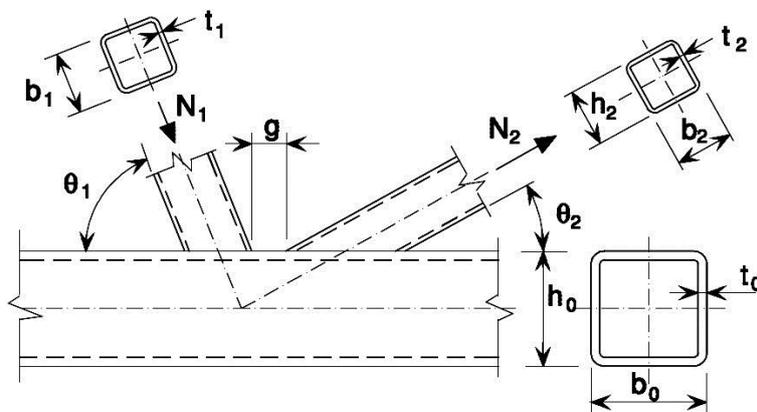


Figura 85 – Pormenor geométrico da Ligação K

Este caso irá ser dividido em quatro sub-casos (modos de rotura), nomeadamente: Rotura da face da corda, Corte na Corda, Rotura do elemento diagonal e Punçoamento.

4.2.2.1. Caso 2 (rotura da face da corda)

Para esta ligação foi criada uma malha de elementos finitos onde foi calculada a tensão instalada em quatro pontos pertencentes a dois elementos, tendo-se comparado os resultados obtidos ao nível de tensões máximas instaladas em 4 pontos da ligação com a tensão de cedência do material, em que os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes.

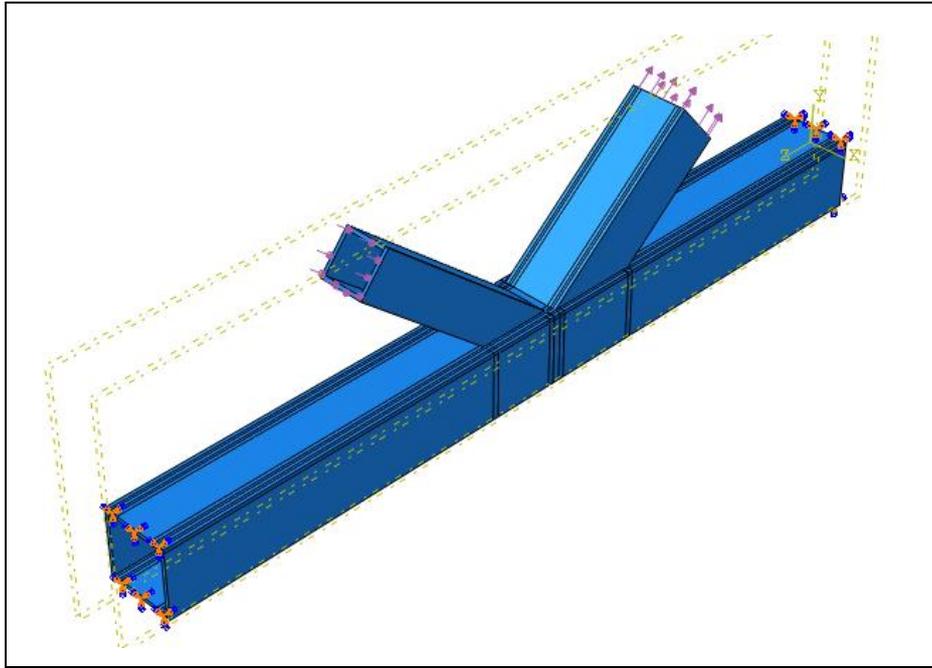


Figura 86 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteiras a uma ligação K, para a situação de Rotura da Face da Corda – Situação 2a

Para a situação de rotura da face da corda (ou rotura da face do tubo principal) e de acordo com a tabela 8 calcularam-se os esforços normais resistentes para esta situação. Na simulação numérica modelaram-se os esforços normais resistentes por intermédio de pressões aplicadas. Sabendo as áreas dos perfis tubulares quadrados 1 e 2 (em que a área do tubo secundário 1 é 444 mm^2 e a área do tubo secundário 2 é 563 mm^2), calcularam-se os valores das pressões P_1 e P_2 , sendo respectivamente, 306 MPa e -333 MPa , devido ao tubo secundário 1 estar sujeito a um esforço normal resistente de compressão e o tubo secundário 2 estar sujeito a um esforço normal resistente de tracção.

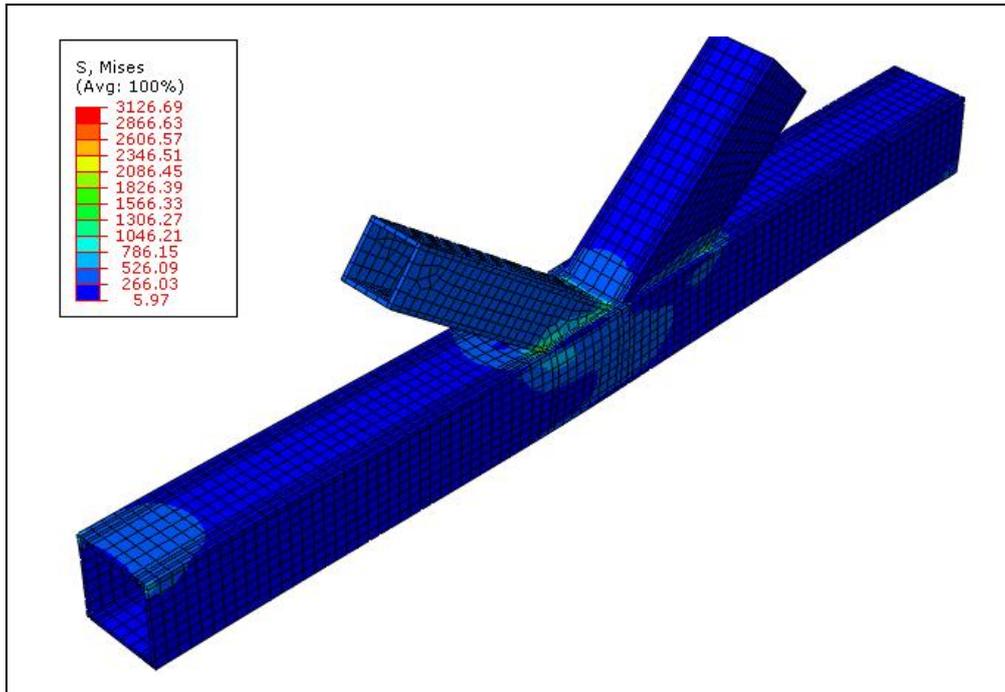


Figura 87 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de rotura da face da corda (rotura a face do tubo principal) – Situação 2a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

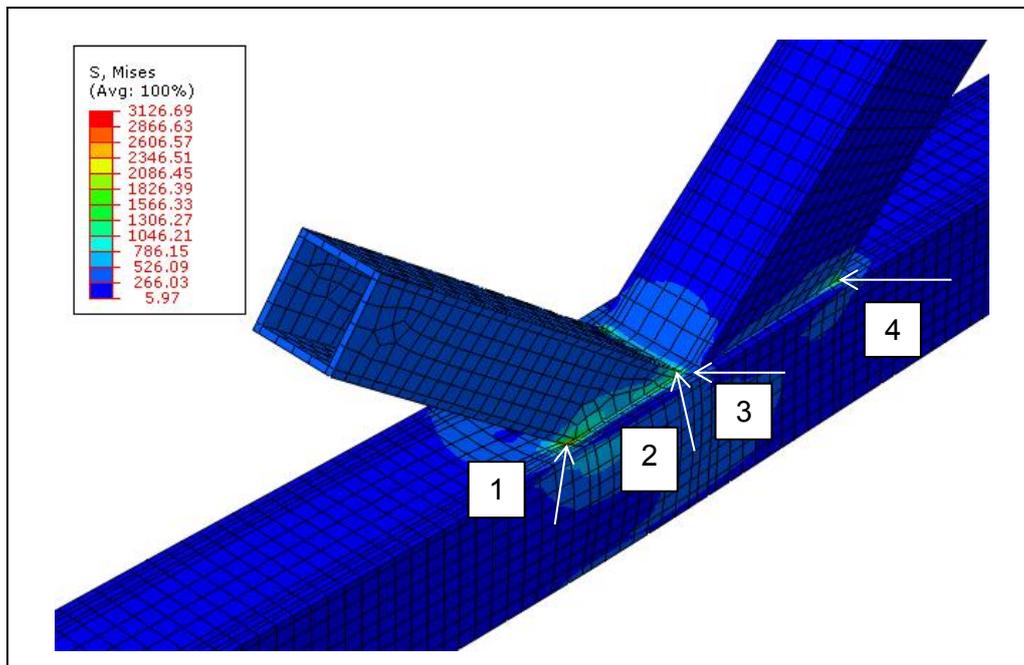


Figura 88 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de rotura da face da corda – Situação 2a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Para este caso (rotura da face da corda ou rotura da face do tubo principal) verifica-se que existem no modelo valores muito superiores à tensão de cedência do material, em que os valores de tensão máxima instalada se localizam na secção 1 do tubo secundário 1, isto porque foi aplicado um elevado esforço normal resistente de compressão o que provocou o “afundamento” do mesmo pelo tubo principal. De notar que as tensões instaladas no modelo superam em muito a tensão de cedência do material constituinte.

4.2.2.2. Caso 2 (corte na corda)

Para a segunda situação (corte na corda ou corte no tubo principal) foram calculados os esforços normais resistentes de acordo com as tabelas 8 e 9. Os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são, respectivamente 137 MPa e -84 MPa, devido ao tubo secundário 1 estar sujeito a um esforço normal resistente de compressão e o tubo secundário 2 estar sujeito a um esforço normal resistente de tracção. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

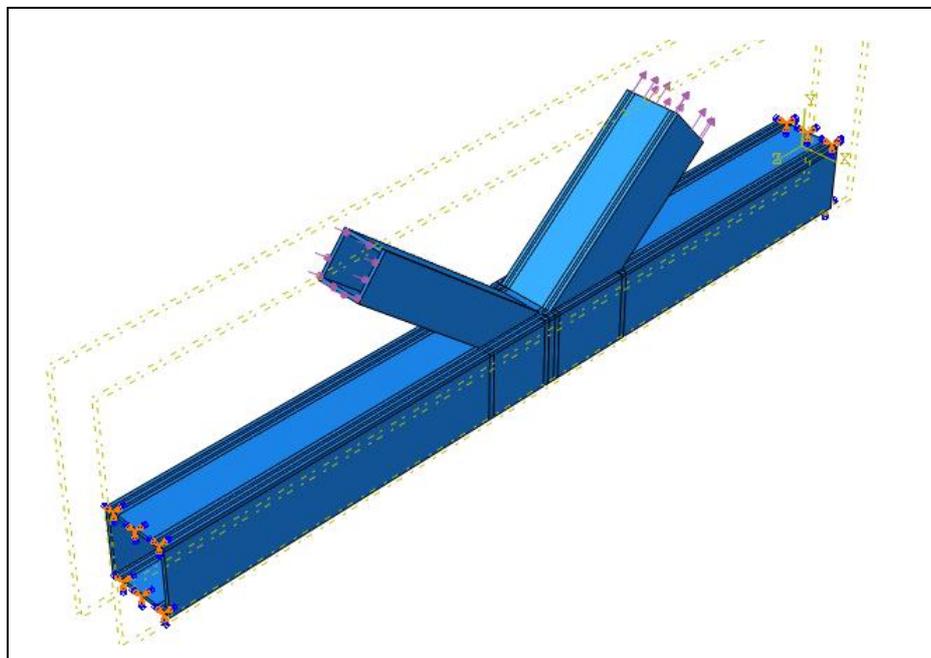


Figura 89 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira à ligação K, para a situação de corte na corda – Situação 2b

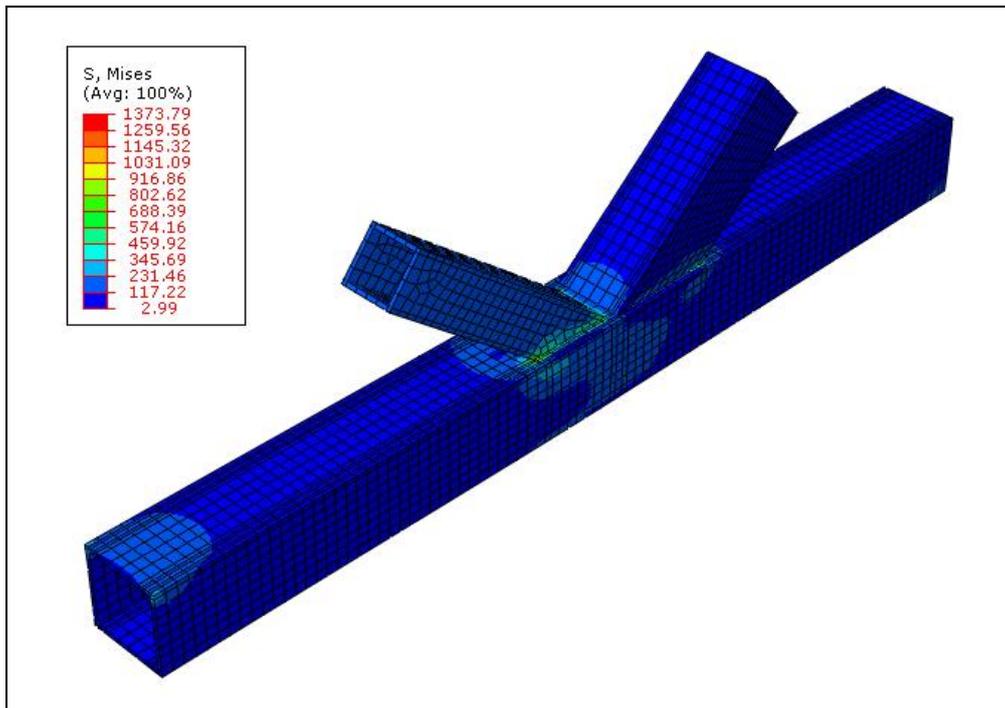


Figura 90 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de Corte na corda ou corte no tubo principal – Situação 2b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

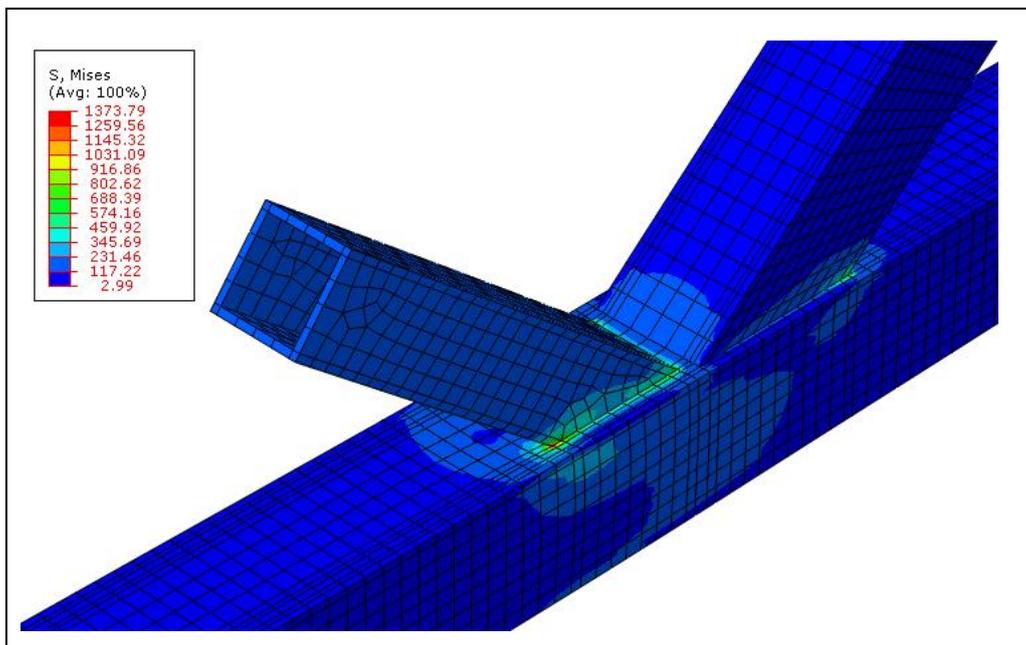


Figura 91 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de corte na corda – Situação 2b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Para o caso de corte no tubo principal (corda), aplicou-se um esforço normal resistente de compressão no tubo secundário 1 que é cerca de duas vezes ao superior ao esforço normal resistente de tracção (tubo secundário 2), o que provoca tensões de corte no tubo

principal, onde a tensão de cedência do material constituinte é ultrapassada. Verifica-se na zona 1 uma zona de concentração de tensões.

4.2.2.3. Caso 2 (rotura do elemento diagonal)

Para a terceira situação (rotura do elemento diagonal), calcularam-se os esforços normais resistentes de acordo com as tabelas 8 e 9. Os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são, respectivamente, 149 MPa e -146 MPa, isto devido ao tubo secundário 1 estar sujeito a um esforço normal resistente de compressão e o tubo secundário 2 estar sujeito a um esforço normal resistente de tracção. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

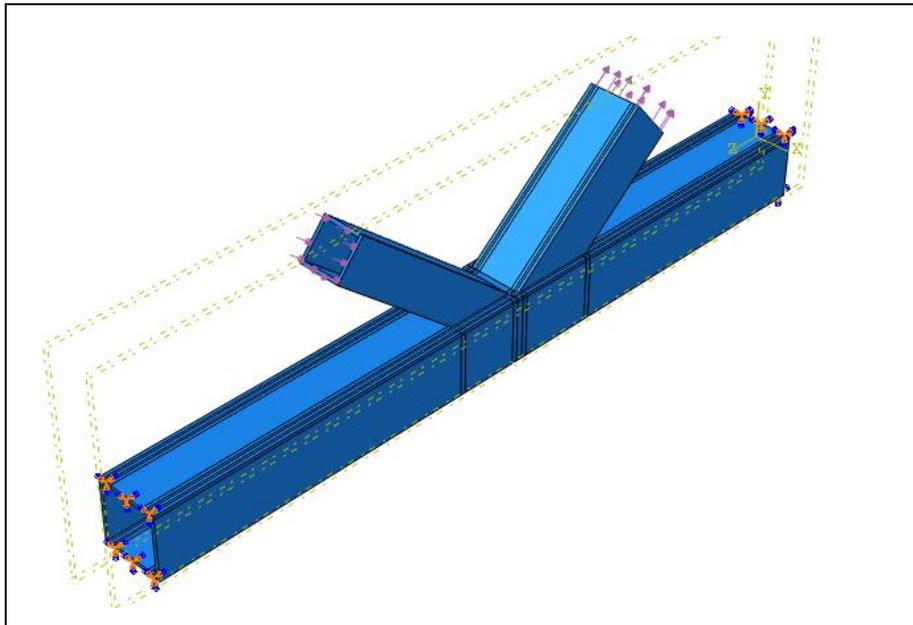


Figura 92 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a ligação K, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2c

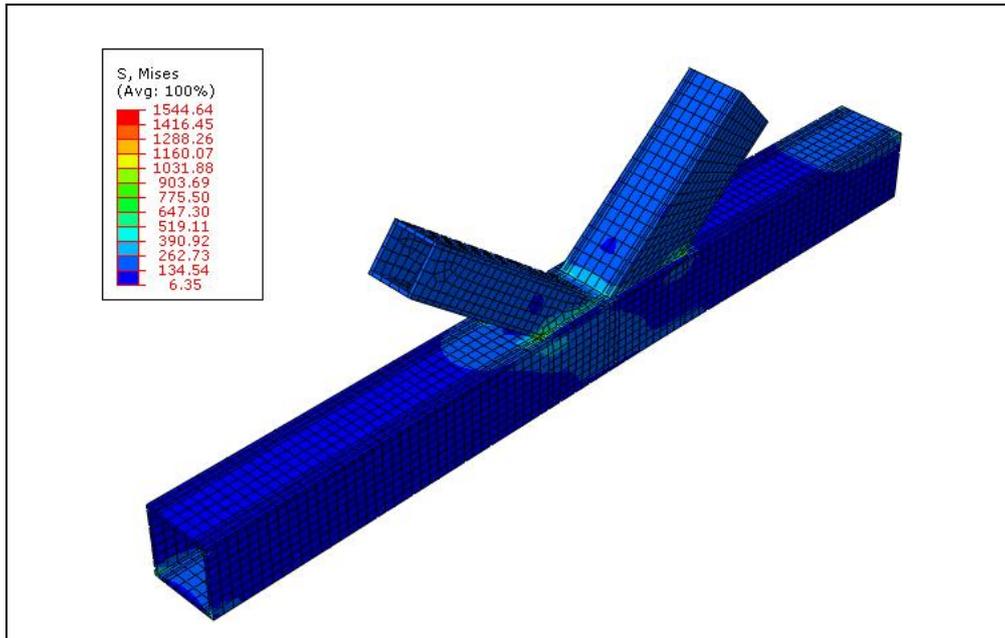


Figura 93 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de rotura do elemento diagonal – Situação 2c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

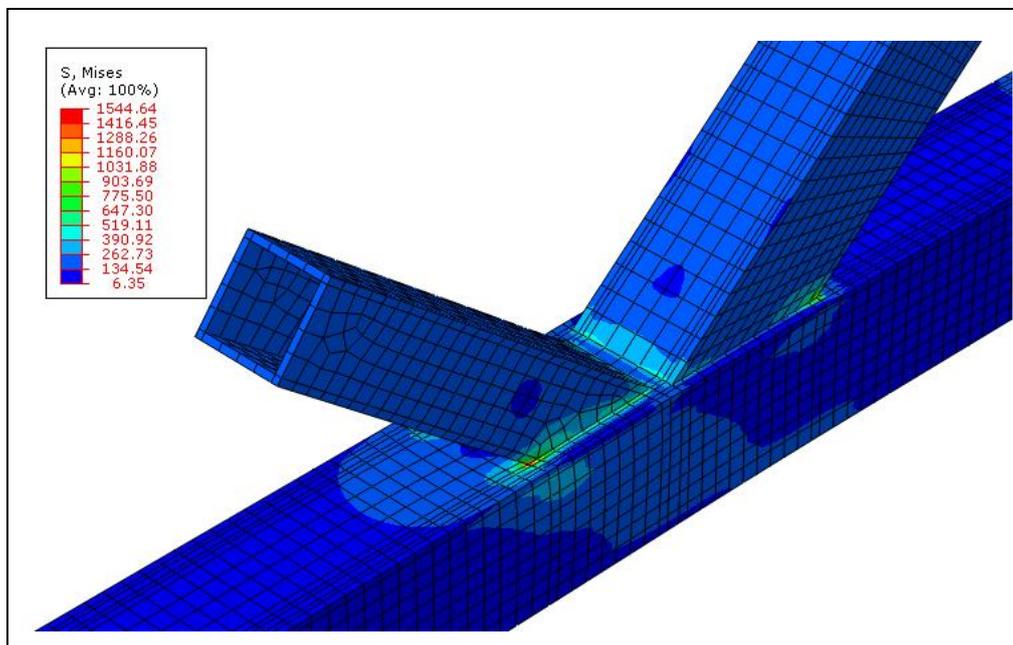


Figura 94 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de rotura do elemento diagonal – Situação 2c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Para o caso de rotura do elemento diagonal, verifica-se que existem valores muito superiores à tensão de cedência do material, tendo esses valores de tensão mais elevada no tubo secundário 1 e no tubo secundário 2, com praticamente os mesmos valores de tensão instalada.

4.2.2.4. Caso 2 (punçoamento)

Para a quarta situação (punçoamento) calcularam-se os esforços normais resistentes de acordo com as tabelas 8 e 9. Os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são, respectivamente, 3 MPa e -2 MPa. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

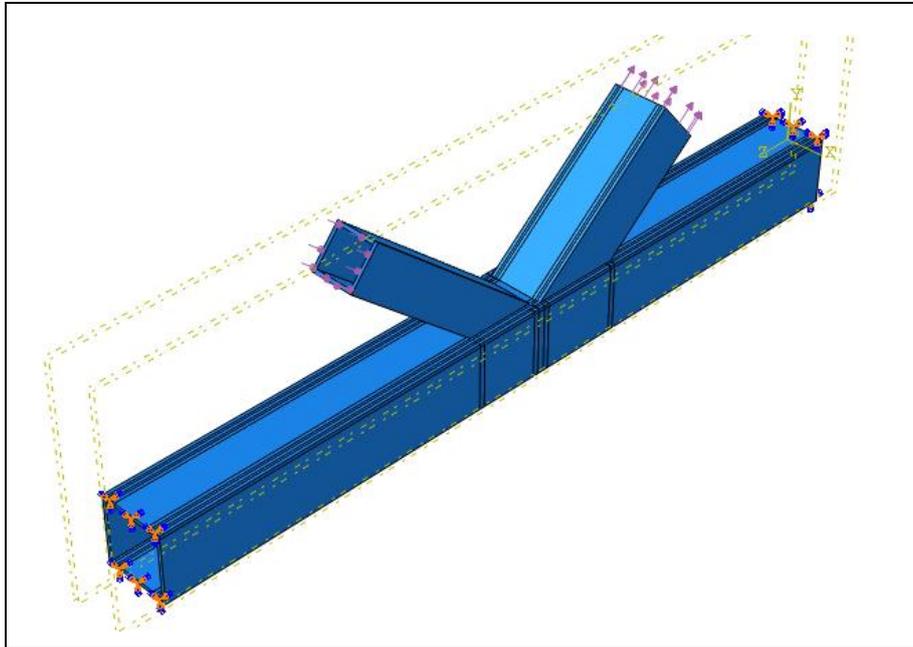


Figura 95 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação K, para a situação de Punçoamento – Situação 2e

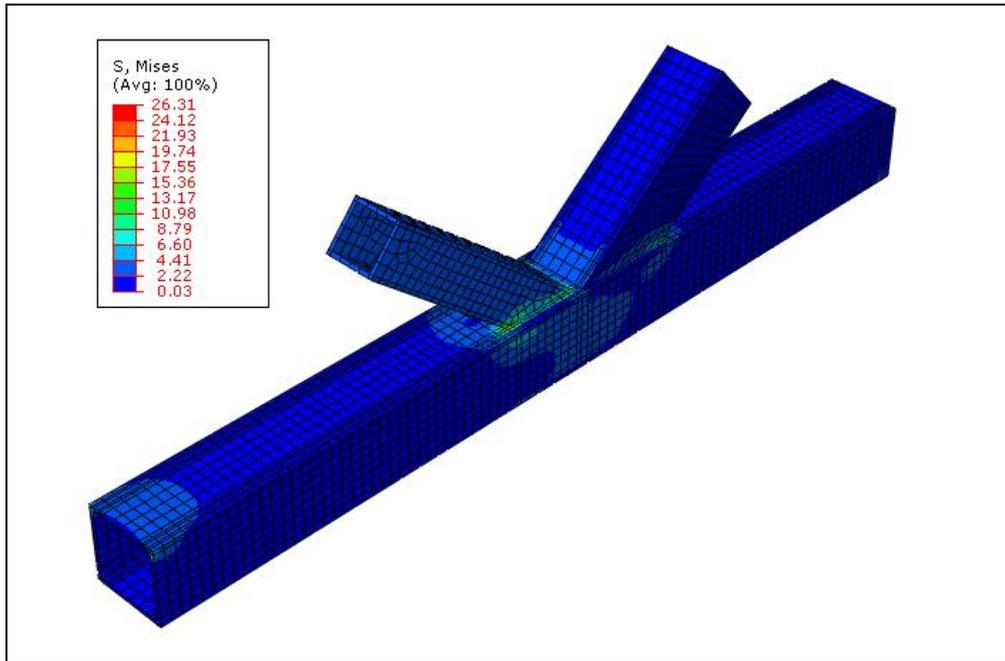


Figura 96 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , para a situação de punçamento – Situação 2e (Factor de escala de deformação igual a 10x)

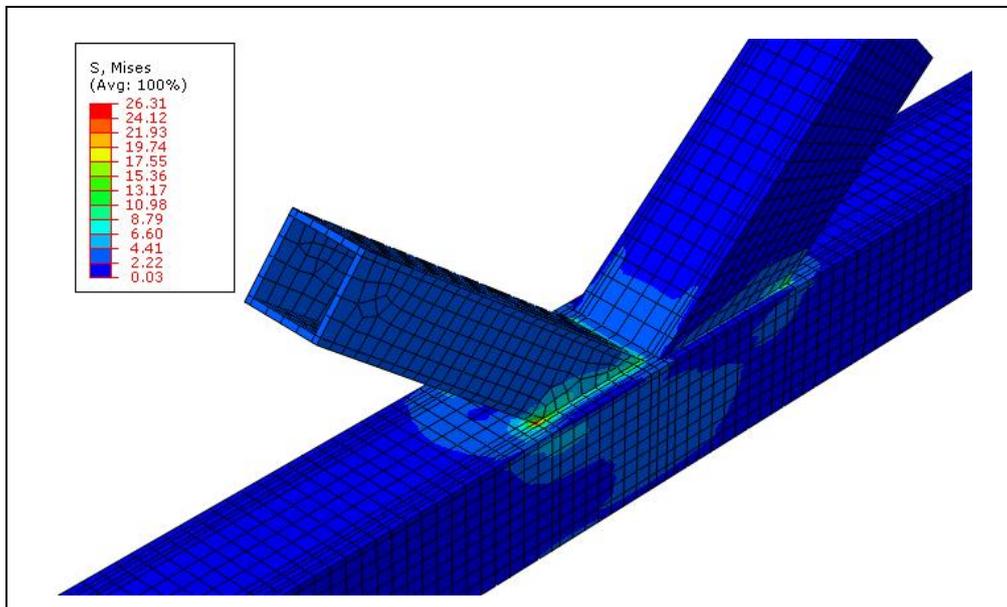


Figura 97 – Pormenor da zona de ligação K entre o tubo secundário 1 e 2 e tubo principal, para a situação de punçamento – Situação 2e (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Para este caso, verifica-se a existência de tensões instaladas muito abaixo da tensão da cedência do material constituinte, no entanto existe uma zona de concentração de tensões localizada no tubo secundário 1.

4.2.2.5. Proposta de melhoria construtiva

Para este caso foi adoptado um reforço com base no recomendado pelo Eurocódigo 3, tendo-se colocado uma chapa inferior entre os tubos secundários 1 e 2 e o tubo principal. A geometria e expressões de cálculo dos parâmetros geométricos encontram-se nas tabelas 11 e 12. Os parâmetros geométricos que definem o reforço estão indicados na tabela 18. Este tipo de reforço serve para evitar a rotura da face da corda e a rotura do elemento diagonal [10]. Simulou-se a ligação K com a aplicação do reforço e verificaram-se novamente as tensões instaladas em quatro pontos da ligação e para três sub-casos (Rotura da face da corda, Corte na Corda e Rotura do elemento diagonal). Não se aplicou este reforço para o caso do punçoamento visto que as tensões máximas instaladas são inferiores à tensão de cedência do material constituinte.

4.2.2.5.1. Caso 2 (rotura da face da corda – com aplicação de reforço)

Para a situação da rotura da face da corda (ou rotura da face do tubo principal), os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são respectivamente, 306 MPa e -333 MPa, devido ao tubo secundário 1 estar sujeito a um esforço normal resistente de compressão e o tubo secundário 2 estar sujeito a um esforço normal resistente de tracção. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

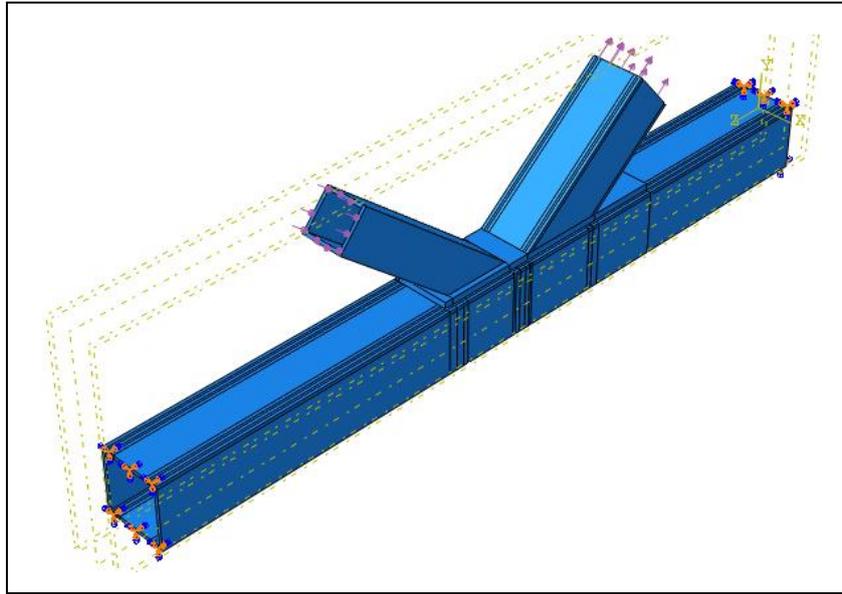


Figura 98 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação em K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 (Rotura da face da corda) – Situação 2f

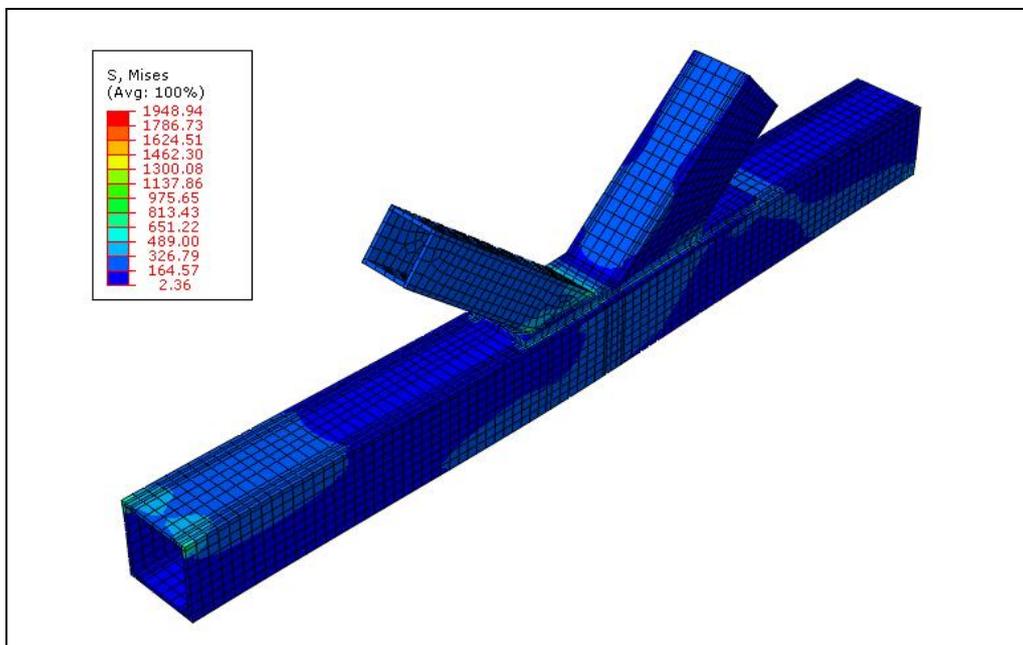


Figura 99 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para a situação de rotura da face da corda – Situação 2f (Factor de escala de deformação igual a 10x)

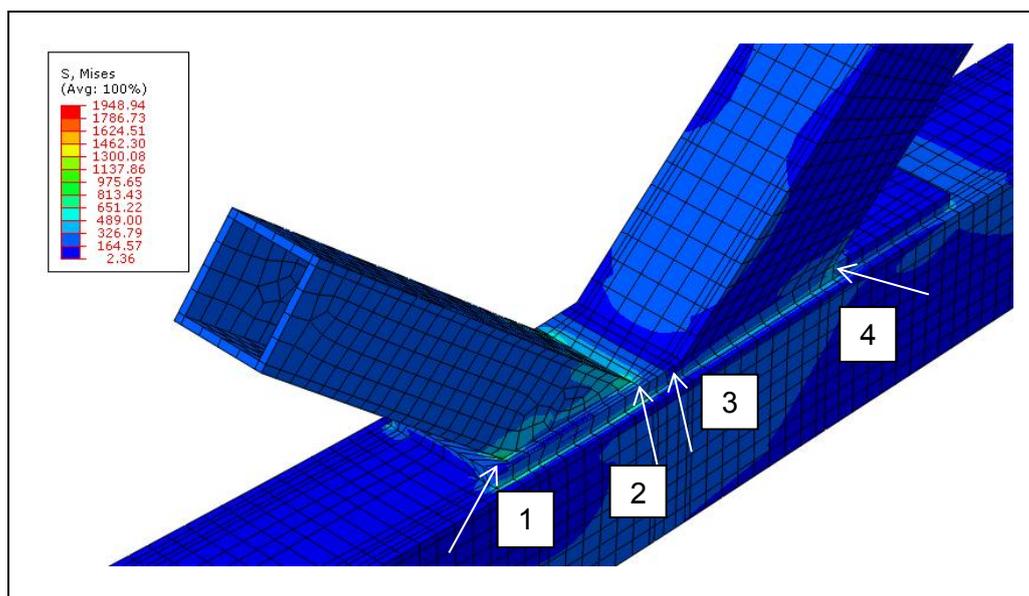


Figura 100 – Pormenor da zona de ligação com aplicação de reforço, para a situação de Rotura da face da corda (Factor de escala de deformação igual a 10x) – Situação 2f

Através da análise das figuras anteriores, verifica-se existir uma boa transmissão de esforços para o tubo principal, uma vez que as tensões instaladas não se localizam apenas numa região, mas sim ao longo do tubo principal. Obteve-se com esta solução um ganho de cerca de 6x em relação ao modelo sem aplicação de reforço. Verifica-se que a zona de concentração de tensões ficou amenizada com esta solução de reforço. Para a construção de estruturas de veículos pesados de passageiros, esta situação é preferível para reforçar as ligações, pois obtém-se uma boa transmissão de esforços ao longo de toda a ligação.

4.2.2.5.2. Caso 2 (corte na corda – com aplicação de reforço)

Para a situação de corte na corda (ou corte no tubo principal), os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são respectivamente 137 MPa e -84 MPa, devido ao tubo secundário 1 estar sujeito a um esforço normal resistente de compressão e o tubo secundário 2 estar sujeito a um esforço normal resistente de tracção. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

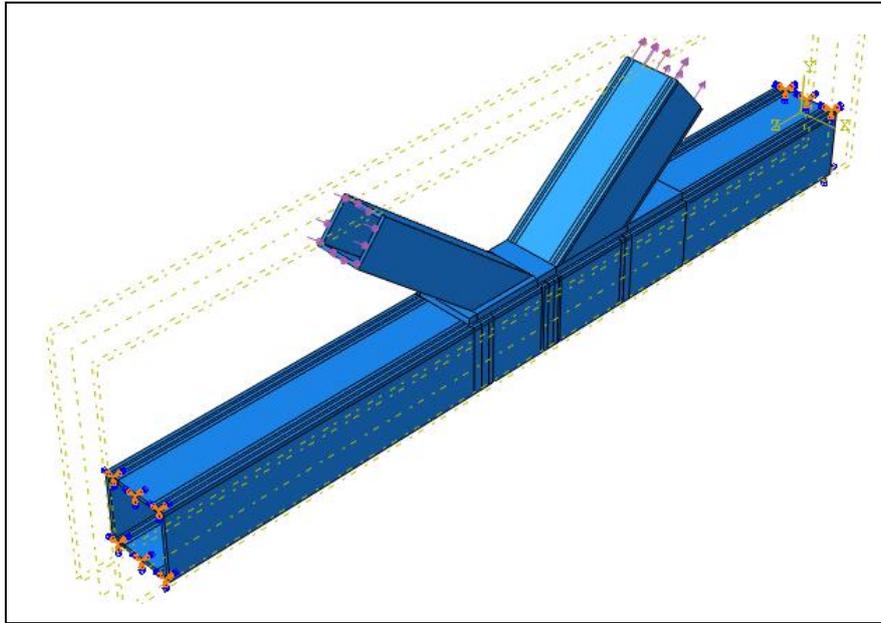


Figura 101 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma ligação K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 (Corte na corda) – Situação 2g

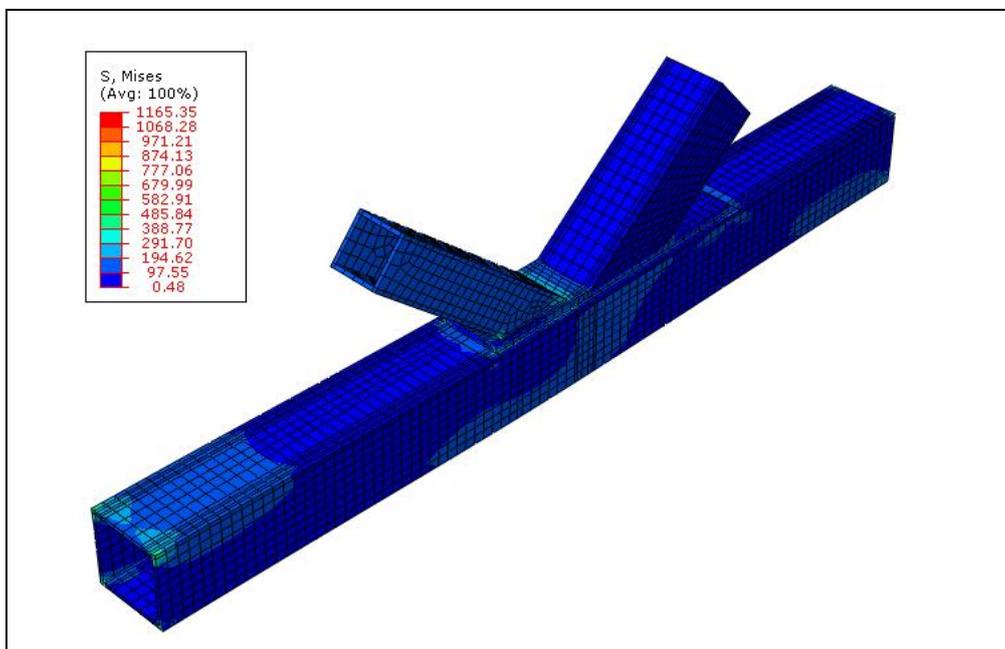


Figura 102 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , e com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 para a situação de Corte na corda – Situação 2g (Factor de escala de deformação igual a 10x)

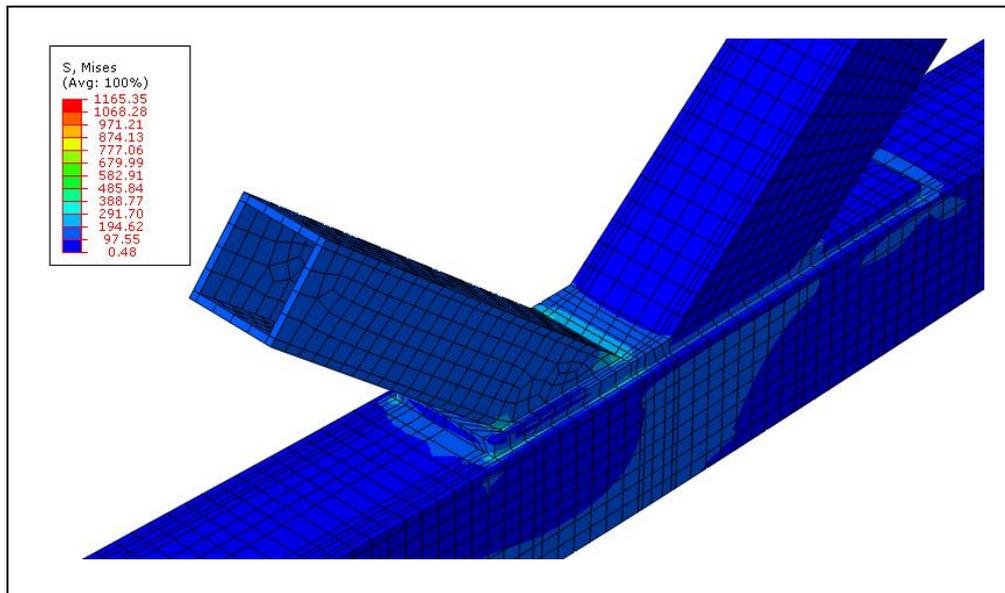


Figura 103 – Pormenor da zona de ligação com aplicação de reforço, para a situação de Corte na corda – Situação 2g (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Através da análise das figuras anteriores, verifica-se existir uma boa transmissão de esforços para o tubo principal, uma vez que as tensões instaladas não se localizam apenas numa região, mas sim ao longo do tubo principal. Com esta solução foi obtido um ganho de cerca de 3x em relação ao modelo sem aplicação de reforço.

4.2.2.5.3. Caso 2 (rotura do elemento diagonal – com aplicação de reforço)

Para a situação de rotura do elemento diagonal, os valores das pressões aplicadas P_1 e P_2 são respectivamente, 149 MPa e -146 MPa. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

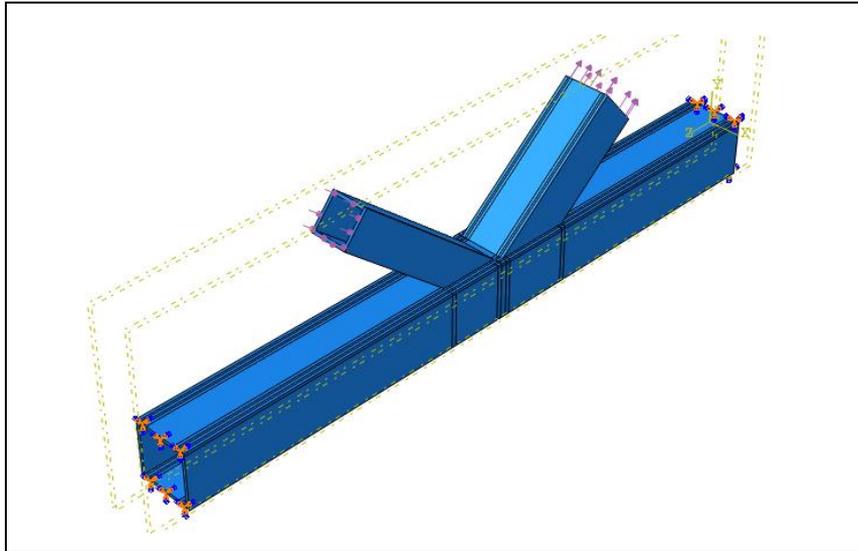


Figura 104 – Aplicação de esforços normais resistentes nos tubos secundários e condições fronteira a uma junta em K, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 - (Rotura do elemento diagonal) – Situação 2h

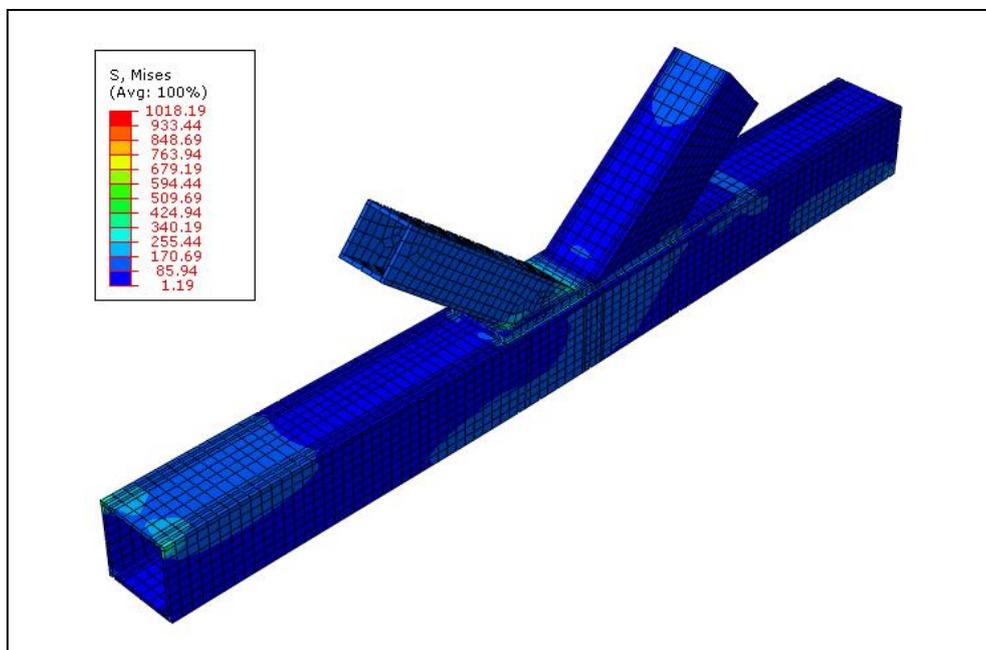


Figura 105 – Malha de elementos finitos com aplicação de pressões P_1 e P_2 , e com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2h (Factor de escala de deformação igual a 10x)

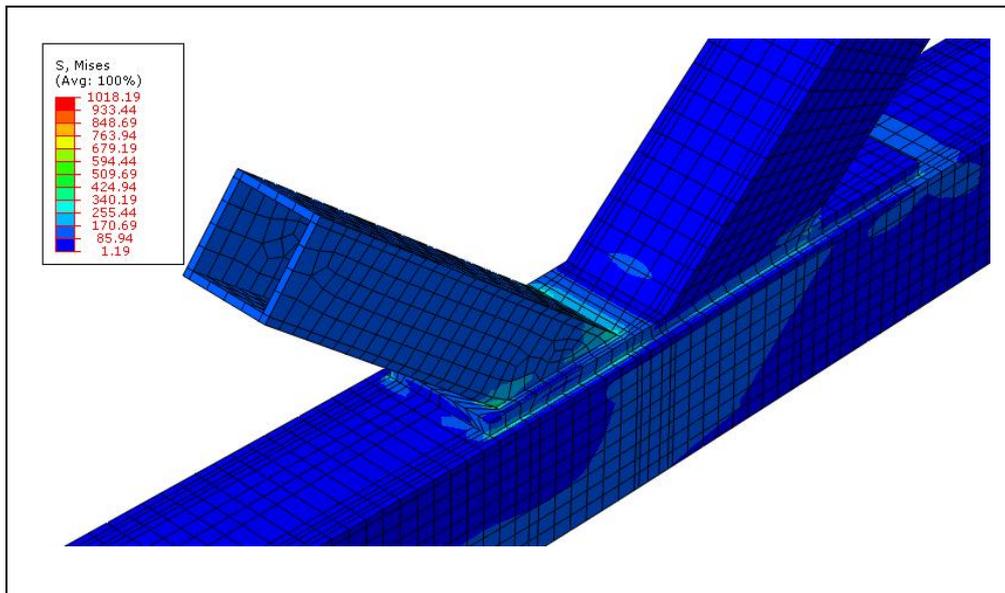


Figura 106 – Pormenor da zona de ligação, com aplicação de reforço, para a situação de Rotura do elemento diagonal – Situação 2h (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Pela análise das figuras anteriores verifica-se que com a utilização do reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 o mesmo faz com que haja uma diminuição das tensões instaladas bem como se consiga uma melhor distribuição dos esforços ao longo de todo o comprimento da ligação. Com esta solução foi obtido um ganho de cerca de 3x em relação ao modelo sem aplicação de reforço.

4.2.2.6. Apresentação de resultados e conclusões

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos ao nível das máximas tensões instaladas em 4 pontos da ligação K para os diferentes modos de rotura, nas situações sem reforço e com aplicação de reforço recomendado pelo regulamento.

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 26 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 2 (Modos de rotura) – sem reforço aplicado

Caso 2 - EC3		(MPa)	Relação com tensão de cedência (%)
Rotura da face da corda	Tensão de cedência	275	
2a	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	2398	872%
2a	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	2031,2	739%
2a	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	504,51	184%
2a	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	2498	908%
Corte na Corda			
2b	Valor máx tensão no canto tubo secundário 1 (1)	595,06	216%
2b	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	676,54	246%
2b	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	150,25	55%
2b	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	632,4	230%
Rotura Elemento diagonal			
2c	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	996,17	362%
2c	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	515,09	187%
2c	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	368,18	134%
2c	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	986,77	359%
Punçoamento		(MPa)	Relação com tensão de cedência (%)
	Tensão de cedência	275	
2d	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	16,08	6%
2d	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	10,25	4%
2d	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	2,45	1%
2d	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	12,69	5%

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Tabela 27 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 2 (Modos de rotura) – com reforço aplicado

		(MPa)	Relação com tensão de cedência (%)
Rotura da face da corda	Tensão de cedência	275	
2e	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	427,95	156%
2e	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	392,8	143%
2e	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	250,62	91%
2e	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	357,94	130%
Corte na Corda			
2f	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	404,57	147%
2f	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	416,08	151%
2f	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	82,94	30%
2f	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	195,59	71%
Rotura Elemento Diagonal		(MPa)	Relação com tensão de cedência (%)
	Tensão de cedência	275	
2g	Valor máx. tensão no canto tubo secundário 1 (1)	78,87	29%
2g	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 1 (2)	306,82	112%
2g	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (3)	52,46	19%
2g	Valor máx. tensão no canto do tubo secundário 2 (4)	230,84	84%

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Como conclusões a retirar para cada um dos modos de rotura e sem aplicação de reforço, podem-se citar as seguintes:

- Para o caso da rotura da face da corda verifica-se que existem no modelo valores de tensão instalada muito superiores à tensão de cedência do material, em que os estes valores de tensão se localizam no tubo secundário 1, devido a se ter aplicado um elevado esforço normal resistente de compressão o que provocou o “afundamento” do mesmo pelo tubo principal. O Eurocódigo 3 prevê para este tipo de rotura valores de carga bastante elevadas (devido a estados limites últimos) que se traduzem em tensões instaladas muito superiores à tensão de cedência do material constituinte e com conseqüente plastificação.

- Para o caso de corte no tubo principal (corda), verifica-se que o esforço normal resistente de compressão no tubo secundário 1 é cerca de duas vezes ao superior ao esforço normal resistente de tracção (tubo secundário 2), o que provoca tensões de corte no tubo principal, onde é ultrapassada a tensão de cedência do material.

- Para o caso de rotura do elemento diagonal, verifica-se que existem valores muito superiores à tensão de cedência do material, tendo esses valores de tensão mais elevada no tubo secundário 1 e no tubo secundário 2 e com aproximadamente os mesmos valores. Este facto deve-se a se ter aplicado pressões de igual valor mas em sentido contrário. Verifica-se que nesta situação as tensões máximas instaladas nos cantos dos tubos têm valores superiores à tensão de cedência.

- Para o caso de punçoamento, verifica-se a existência de tensões instaladas muito abaixo da tensão da cedência do material constituinte.

Como conclusões a retirar para os modelos do caso 2 estes com aplicação de reforço recomendado pelo Eurocódigo 3, podem-se citar as seguintes:

- Para as situações de rotura da face da corda e corte na corda, verifica-se a existência de tensões instaladas superiores à tensão da cedência do material. No entanto, em comparação com o caso 1 (caso sem reforços) obtém-se para o caso de rotura da face da corda uma tensão instalada cerca de 6x menor que a tensão máxima obtida no modelo original enquanto no caso de corte na corda e rotura do elemento diagonal obteve-se um ganho de cerca de 3x em relação à tensão máxima obtida no modelo original. Para a

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

situação de rotura do elemento diagonal, verifica-se a existência de tensões instaladas superiores à tensão de cedência do material nomeadamente nos pontos que ficam a meio da ligação (entre tubos secundários e tubo principal). No punçoamento obteve-se um ganho de cerca de 2x em relação à tensão máxima instalada no modelo sem reforço.

- Verifica-se que houve melhorias ao nível das tensões instaladas podendo-se daqui concluir e tendo como base as análises obtidas anteriormente que a utilização do reforço promove uma melhor distribuição ao nível das tensões e boa transmissão de esforços dos tubos secundários (1 e 2) para o tubo principal (0).

Uma outra solução que é recomendada no Eurocódigo 3 (tabela 5) passa pela colocação de um reforço mediante a aplicação de duas chapas laterais no tubo principal (para evitar a rotura da corda por corte), no entanto essa não é uma boa solução devido à necessidade de colocação de painéis interiores e exteriores durante a construção de veículos pesados de passageiros.

4.2.3. Simulação numérica do caso 3 – Ligação em cotovelo soldada

Para a ligação recomendada pelo Eurocódigo 3, nesta Dissertação tratada como Caso 3, o estudo irá incidir-se numa junta em cotovelo soldada.

Numa primeira abordagem e à semelhança do estudo dos casos anteriores simulou-se um tubo com as dimensões 60x60x3 [mm] de modo a poder representar os tubos quadrangulares da ligação, tendo-se determinado a tensão instalada de von Mises no topo superior estando este sujeito ao momento flector actuante calculado para a condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,20$, com o valor total de 5052 N·m. Na simulação numérica foram utilizados elementos sólidos do tipo *brick* C3D20 com três elementos ao longo da espessura, tendo-se aplicado o momento flector actuante distribuído por 8 nós na extremidade de um tubo com elementos do tipo casca. Na outra extremidade do tubo simples utilizou-se um encastramento como condição fronteira.

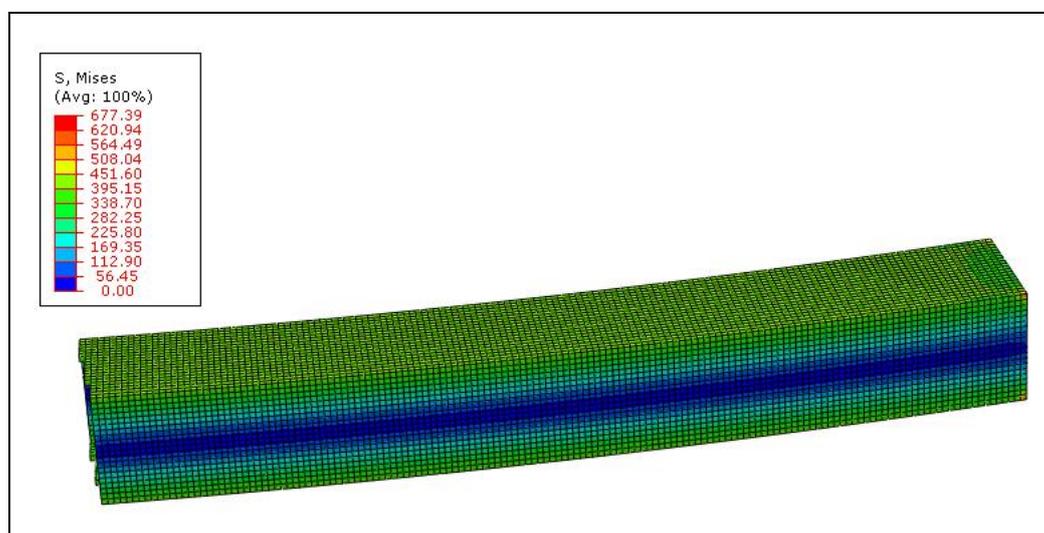


Figura 107 – Simulação de um tubo 60x60x3 [mm] sujeito a um momento flector para a condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,20$ (Factor de escala de deformação igual a 10x)

A tensão de von Mises instalada no topo do tubo simplesmente encastrado é 403 MPa, sendo este o valor de referência para o dimensionamento da ligação em cotovelo soldada com tubos de secção quadrada.

Simulou-se numericamente a ligação com elementos sólidos do tipo *brick* C3D20 com três elementos ao longo da espessura. Aplicou-se o momento distribuído por 4 nós, com o valor de 5052 N·m a uma extremidade de um tubo com elementos do tipo casca

encontrando-se a outra extremidade com a aplicação de uma condição fronteira. Esta ligação foi simulada numericamente para a condição $N_{ed}/N_{pl,Rd} = 0,20$.

4.2.3.1. Apresentação de resultados e identificação de zonas críticas

Para esta ligação foi criada uma malha de elementos finitos onde foi determinada a tensão máxima instalada em dois pontos pertencentes à ligação, tendo-se verificado os resultados ao nível das tensões instaladas e estas comparadas com a tensão de cedência do material constituinte dos tubos de secção quadrada. Os cálculos efectuados para esta ligação encontram-se descritos no ponto 3.3.3.1 deste trabalho. Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

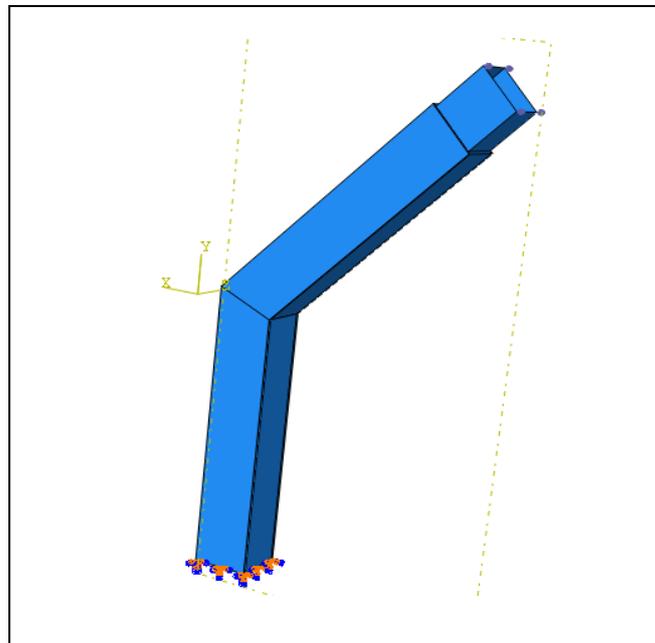


Figura 108 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° – Situação 3a

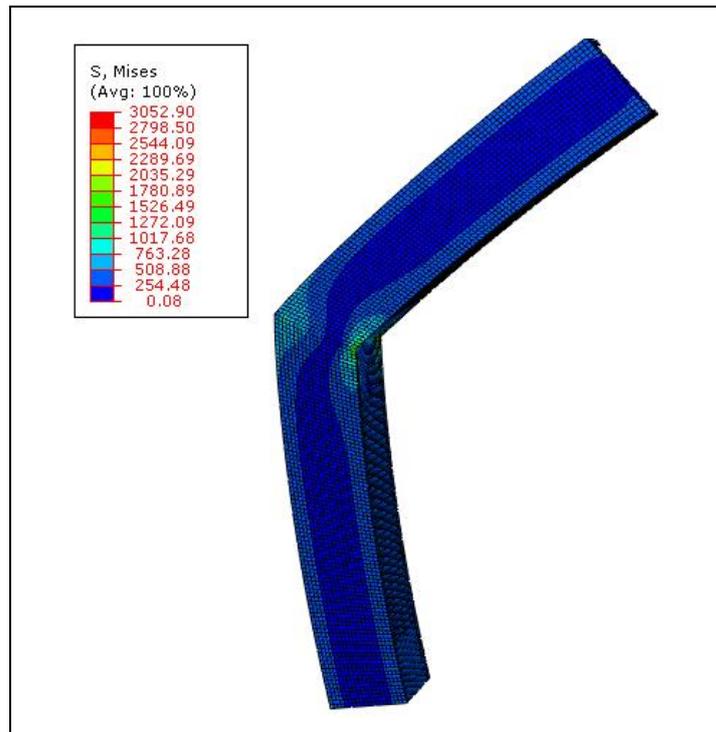


Figura 109 – Malha de elementos finitos para junta em cotovelo soldada, ligada através de dois tubos $60 \times 60 \times 3 \text{ mm}^3$ – Situação 3a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

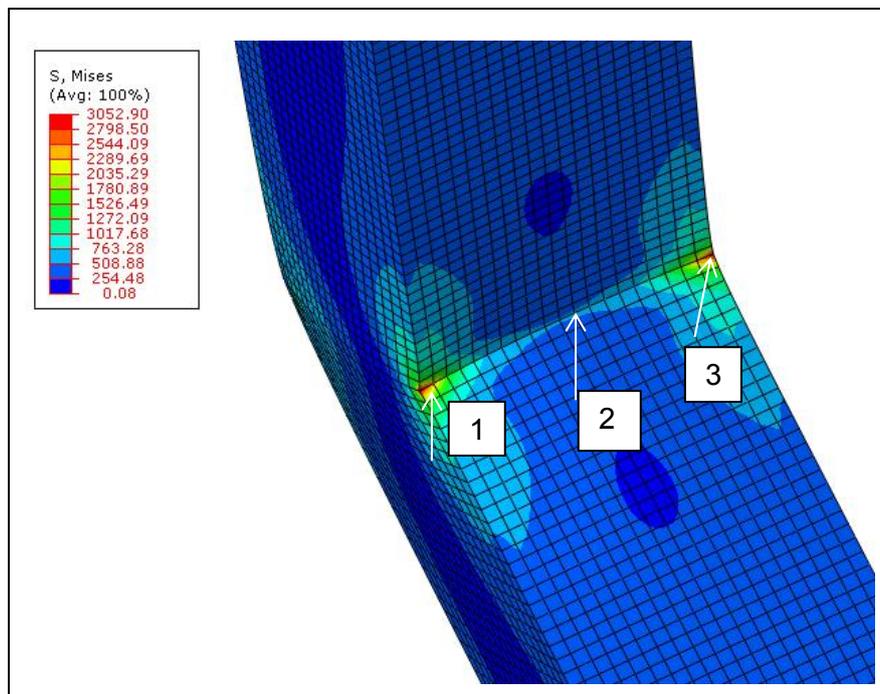


Figura 110 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada – Situação 3a (Factor de escala de deformação igual a 10x)

De acordo com as figuras anteriores verifica-se existir uma grande concentração de tensões junto aos cantos interior e exterior da ligação entre os dois tubos, onde as

tensões instaladas são muito superiores à tensão de cedência do material constituinte. À semelhança dos casos anteriores, ir-se-ão aplicar reforços na zona de ligação entre tubos por forma a baixar as tensões máximas instaladas na ligação.

4.2.3.2. Propostas de melhoria construtiva

Foi aplicado um reforço com base no recomendado pelo Eurocódigo 3 [10], em que este possui uma espessura de 10 mm na zona de ligação entre os tubos de secção quadrada. Pela análise numérica por elementos finitos foram determinadas as tensões máximas instaladas em dois pontos desta ligação, tendo-se utilizado elementos do tipo *brick* C3D20 com três elementos ao longo da espessura, no qual foi aplicado um momento flector actuante com o valor de 5052 N·m numa extremidade de um tubo com elementos do tipo casca, encontrando-se a outra extremidade com a aplicação de uma condição fronteira (encastramento). Os resultados obtidos ao nível das tensões instaladas na ligação são apresentados nas figuras seguintes.

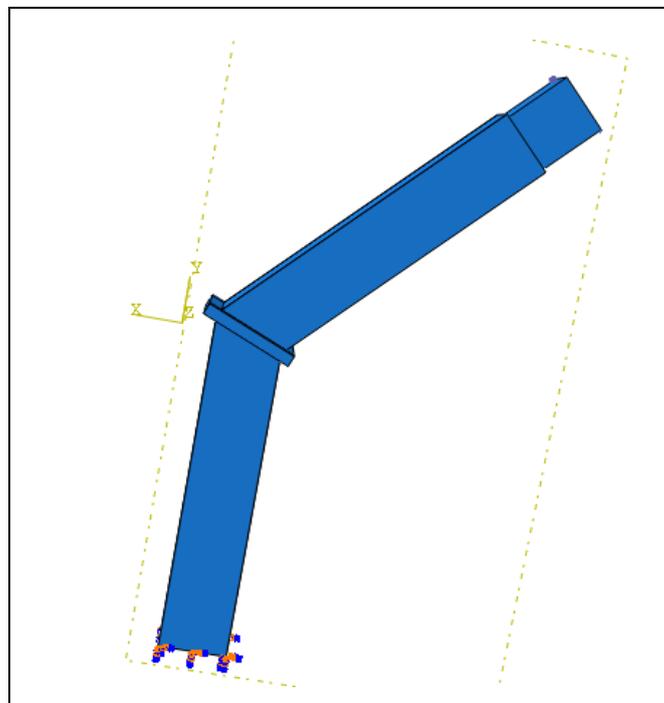


Figura 111 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° e com reforço aplicado segundo Eurocódigo 3 – Situação 3b

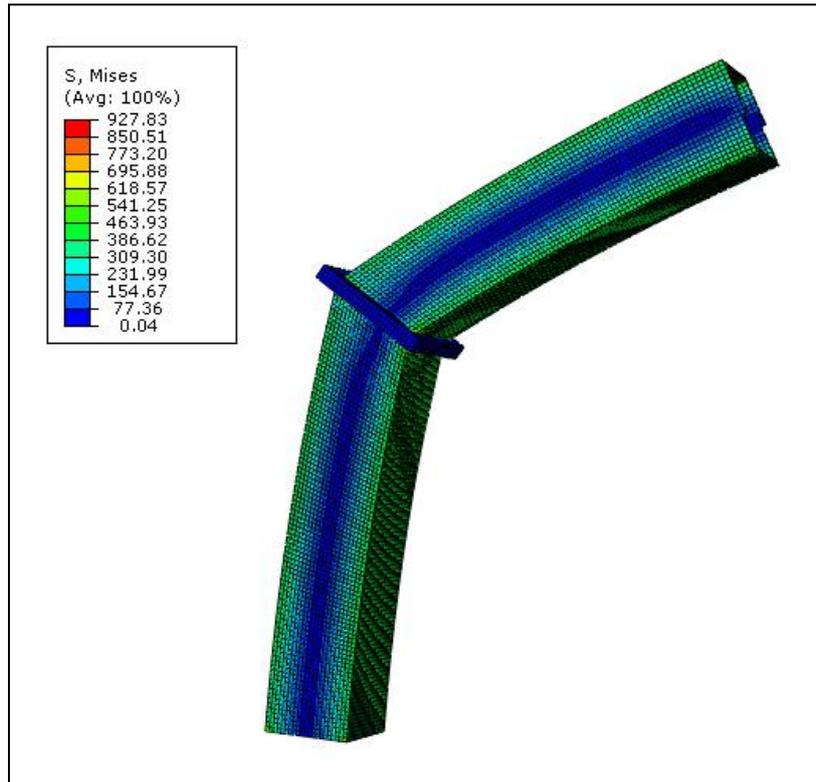


Figura 112 – Malha de elementos finitos para a junta em cotovelo soldada, com reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 – Situação 3b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

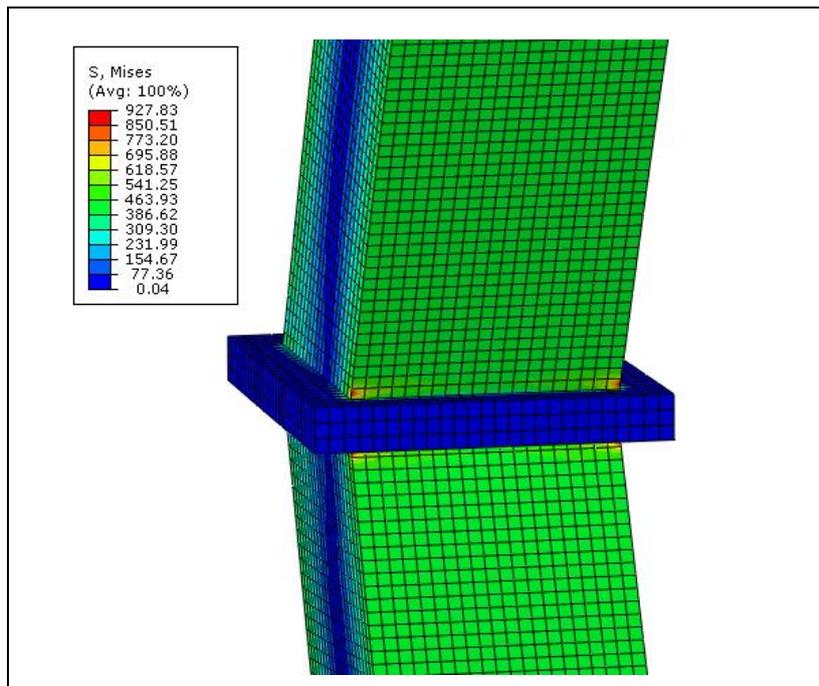


Figura 113 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada, com aplicação de reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 – Situação 3b (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Pela análise das figuras anteriores verifica-se existir uma boa transmissão de esforços entre os dois perfis tubulares no entanto existem zonas de concentração de tensões junto ao reforço e a ligação entre as peças tubulares com valores de tensão instalada acima do valor de tensão de cedência do material. Verifica-se que a tensão instalada nos dois tubos de secção quadrada é 400 MPa, ou seja, praticamente o mesmo valor de tensão que se obteve para um tubo simplesmente encastrado numa das suas extremidades e sujeito ao mesmo momento flector.

Em alternativa testou-se um outro reforço na zona de ligação, tendo-se utilizado o mesmo reforço anterior e acrescentado um outro reforço mas em forma de cunha e com comprimento de 40 mm, tendo-se obtido as tensões instaladas na ligação de acordo com as figuras seguintes.

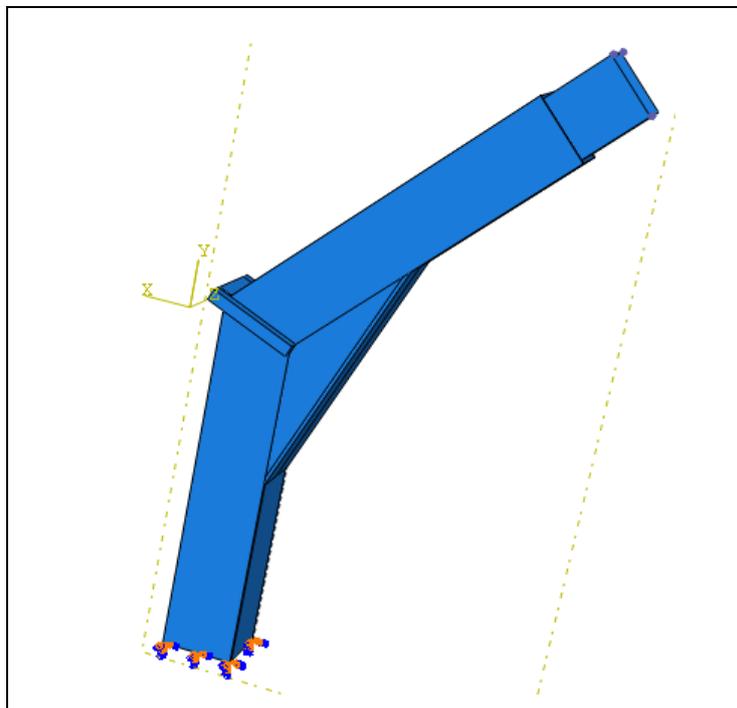


Figura 114 – Aplicação de momento e condições fronteira a uma junta em cotovelo soldada, com tubos ligados a 135° e reforçada com dois tipos de reforço – Situação 3c

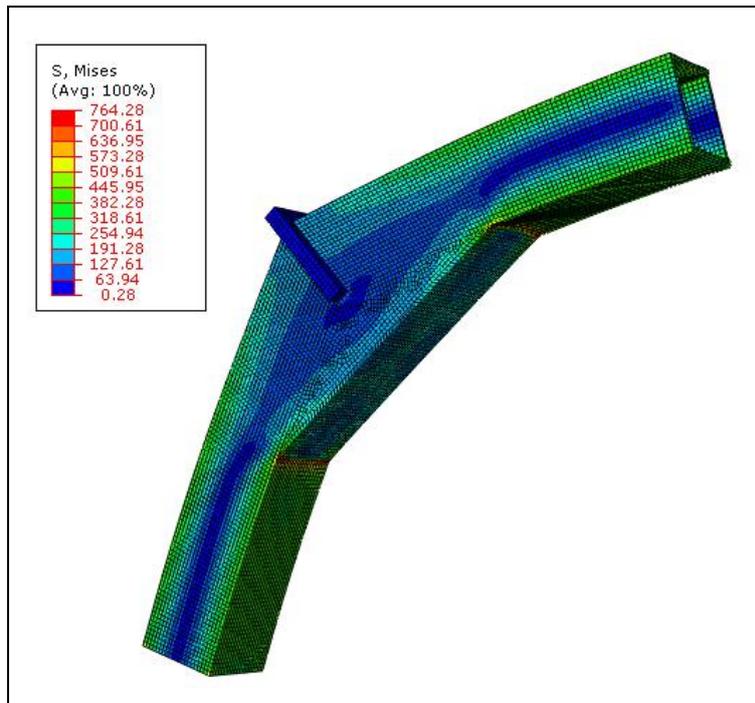


Figura 115 – Malha de elementos finitos para a junta em cotovelo soldada, com aplicação de dois reforços em simultâneo – Situação 3c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

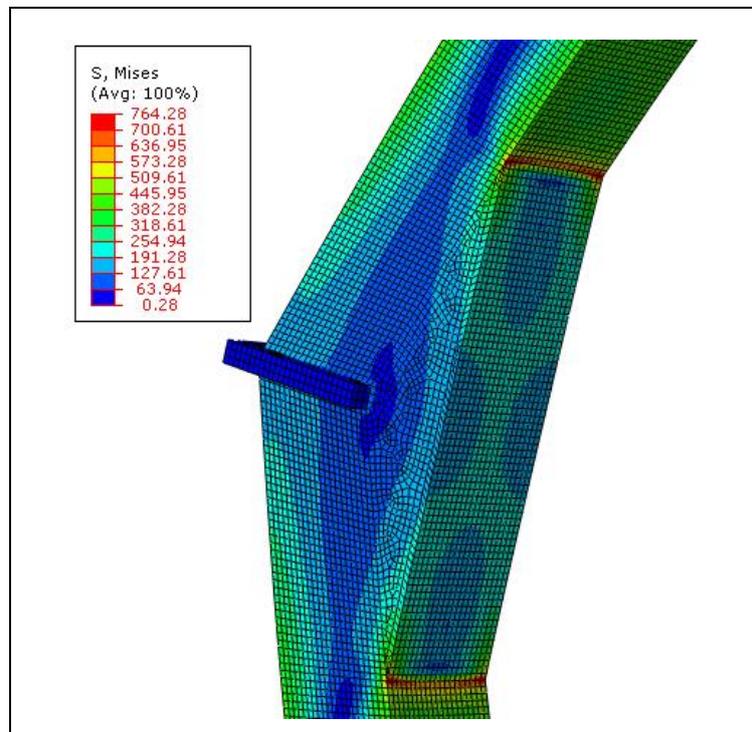


Figura 116 – Pormenor da zona de ligação da junta em cotovelo soldada, com aplicação de dois reforços em simultâneo – Situação 3c (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Analisando as figuras anteriores verifica-se que as máximas tensões instaladas deixaram de se localizar nos cantos da ligação junto ao reforço e passaram a localizar-se na zona

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

de ligação superior e inferior entre as peças tubulares e o reforço em forma de cunha. Verifica-se que as tensões instaladas nos tubos de secção quadrada possuem valores inferiores à tensão instalada num tubo simplesmente encastrado para o mesmo flector aplicado, no entanto os valores de tensão são superiores à tensão de cedência do material.

4.2.3.3. Apresentação de resultados e conclusões

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados obtidos ao nível das tensões máximas instaladas para as situações do modelo original (sem reforços) e com aplicação de reforço recomendado pelo Eurocódigo 3.

Tabela 28 – Apresentação de resultados obtidos para o estudo do Caso 3 – Ligação em cotovelo soldada

		(MPa)	Relação com tensão de cedência (%)	
Modelo Original	Tensão de cedência	275		
3a	Valor a meio da ligação (ponto 2)	637,59	232%	
3a	Valor máx tensão no canto tubo (ponto 1)	2088,19	759%	
3a	Valor máx tensão no canto do tubo (ponto 3)	2290,82	833%	
Com reforço recomendado pelo EC3				Ganho $\frac{\sigma_{modelo}}{\sigma_{obtida}}$
3b	Valor a meio da ligação (ponto 2)	398,56	145%	1,60
3b	Valor máx tensão no canto tubo (ponto 1)	927,4	337%	2,25
3b	Valor máx tensão no canto do tubo (ponto 3)	927,4	337%	2,47

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Como conclusões relativamente a este caso são referidas as seguintes;

Verifica-se que com a colocação do reforço recomendado pelo Eurocódigo 3 as tensões instaladas diminuíram, tendo-se obtido com esta solução uma tensão máxima instalada cerca de 2,5x menor que a tensão máxima obtida no modelo original, no entanto estes valores de tensão são superiores à tensão de cedência do material constituinte das peças tubulares de secção quadrada.

Com a alternativa de colocação de dois reforços em simultâneo verifica-se um ganho de cerca de 3x em relação à tensão máxima obtida no modelo original, no entanto, as mesmas ainda são superiores ao valor da tensão de cedência do material constituinte. Como possível melhoria a ser realizada passaria por se aplicar cordões de soldadura nas regiões com maior concentração de tensões.

4.2.4. Análise não linear com plasticidade – Método de Riks

Foi escolhido um dos casos anteriormente estudados para a realização de uma análise não linear com plasticidade aplicando o método de Riks (método de controlo de deslocamento). O método de Riks deve ser usado para prever situações de instabilidade e para o estudo de colapso em estruturas. A solução para o equilíbrio estático durante uma fase instável pode ser encontrada utilizando este método por meio de controlo de deslocamento o que permite prever a instabilidade em regiões limite e pela qual não se consegue obter convergência. Este método admite que a amplitude da carga é uma variável e faz uma análise não linear com a resolução de um sistema de equações admitindo a carga como sendo um factor de carga proporcional. Em alternativa pode-se usar o método de Riks modificado como se mostra na figura seguinte (em que se verifica a evolução do factor de carga proporcional em função do deslocamento).

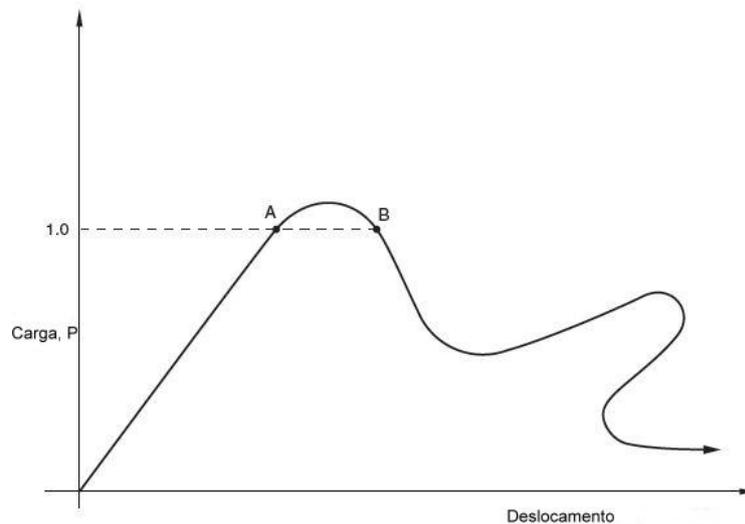


Figura 117 – Evolução de um comportamento não linear em função da carga P aplicada e deslocamento

4.2.4.1 Análise não linear – Material com tensão de cedência de 275 MPa

Escolheu-se para a realização desta análise, o caso da ligação em T sem a utilização de reforços, tendo esta sido simulada com elementos sólidos do tipo *brick* C3D20 e utilizando três elementos ao longo da espessura, foi aplicado um momento flector de 800 N·m na extremidade de um tubo com elementos do tipo casca, sendo o momento total dividido por 8 nós. Aplicando o método de Riks é controlado o deslocamento de um ponto pertencente ao tubo secundário segundo o eixo z-z ao longo da aplicação da carga. A curva representativa do comportamento do material utilizado é apresentada na figura seguinte.

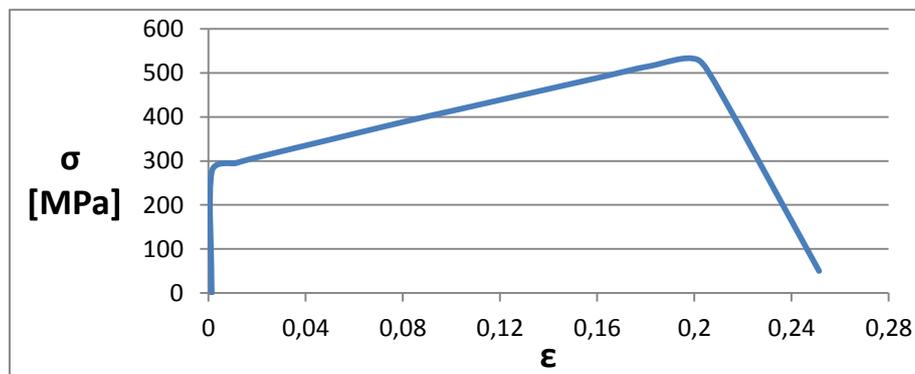


Figura 118 – Curva de comportamento do material utilizado na primeira simulação com análise não linear

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Para a simulação numérica, os valores que foram admitidos são referentes à zona plástica da curva de comportamento representativa do material constituinte (valores obtidos a partir da tensão de cedência do material de 275 MPa).

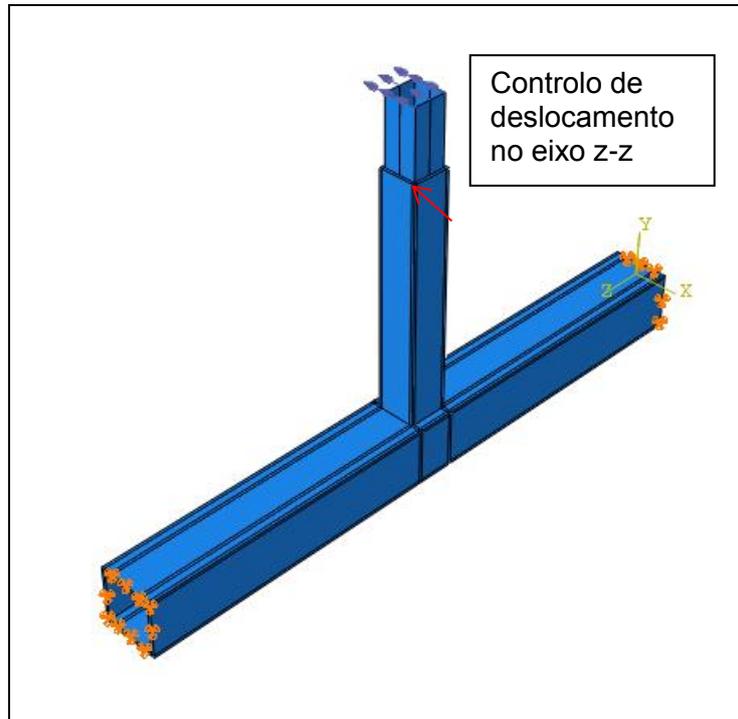


Figura 119 – Aplicação de momento fletor no tubo secundário segundo o eixo z-z e condições fronteira na simulação com plasticidade de uma junta soldada em T

É controlado um deslocamento segundo o eixo z-z num nó que pertence ao tubo secundário, como se mostra na figura seguinte.

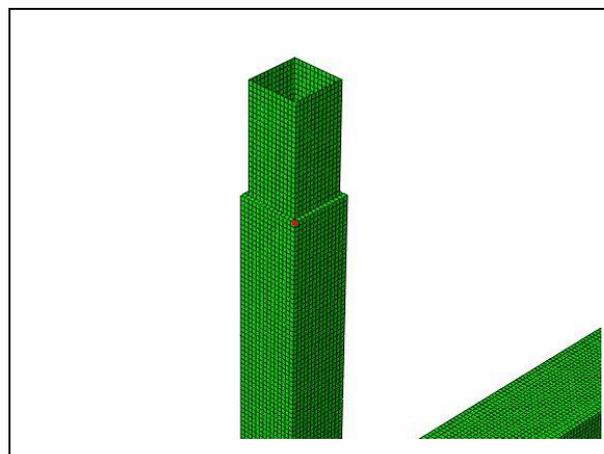


Figura 120 – Controlo de deslocamento num ponto pertencente ao tubo secundário

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Nas figuras seguintes, mostra-se a variação da distribuição de tensões na zona de ligação entre o tubo secundário e tubo principal em função do aumento do factor de carga proporcional.

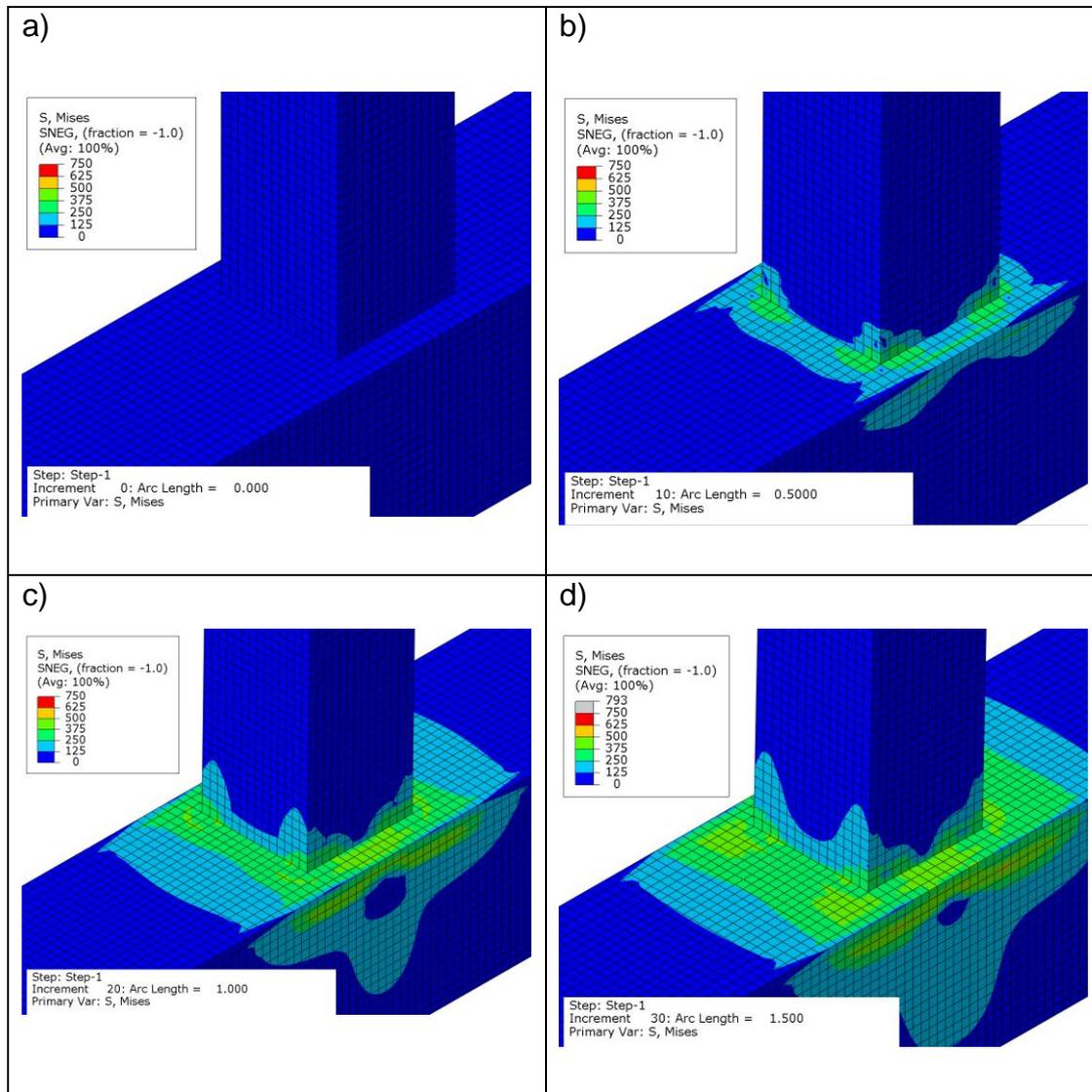


Figura 121 – Resultados da análise não linear com plasticidade: a) Factor de carga = 0; b) Factor de carga = 0.447; c) Factor de carga = 0.6463; d) Factor de carga = 0.7323 – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

Verifica-se pelas imagens seguintes a distribuição de tensões na zona de ligação entre o tubo secundário e o tubo principal para o factor de carga proporcional (LPF) igual a um, em que é o valor de carga previsto pelo Eurocódigo 3 (aplicação de um momento flector de 800 N·m), bem como a zona na ligação onde a tensão de cedência foi ultrapassada.

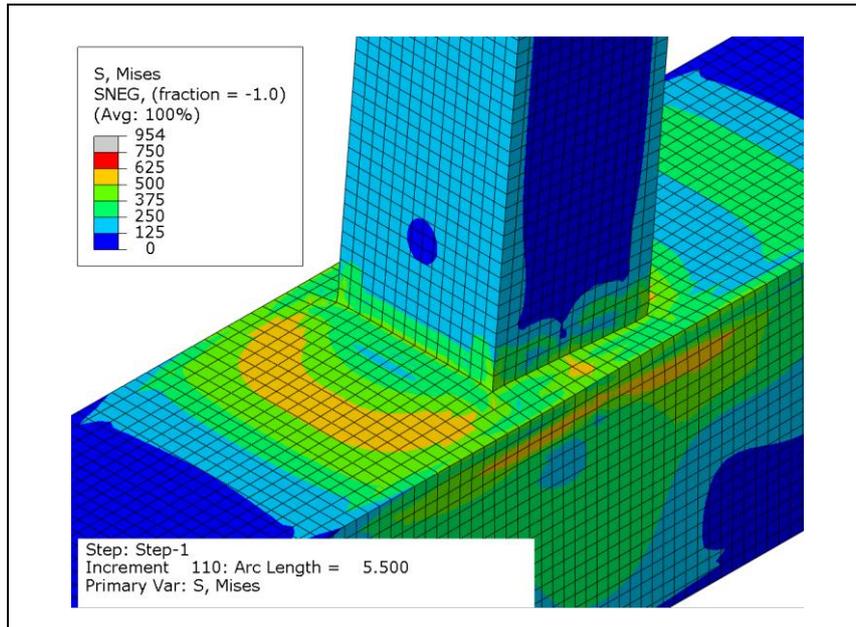


Figura 122 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1 – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

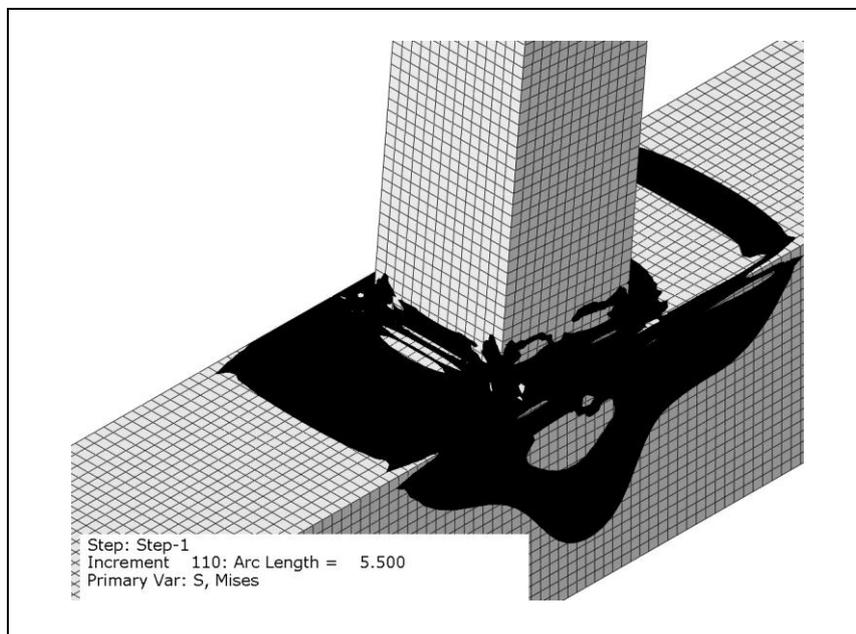


Figura 123 – Zona de concentração de tensões com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta (Factor de escala de deformação igual a 1x)

Na figura seguinte mostra-se a região onde foi ultrapassada a tensão de cedência do material que se verifica no final da simulação numérica, para um factor de carga proporcional de 1,295.

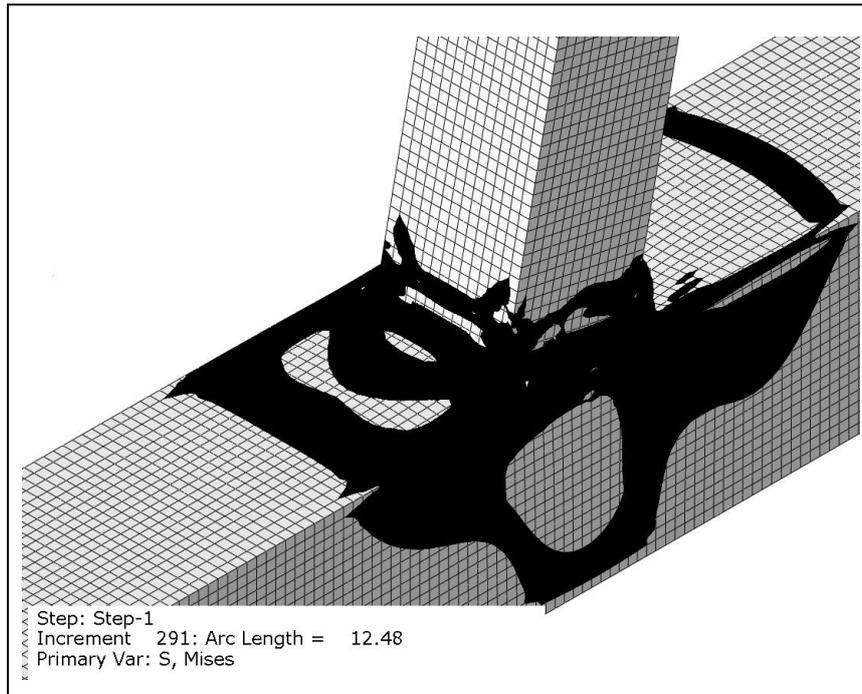


Figura 124 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

Apresenta-se a variação do factor de carga proporcional (LPF) em função do deslocamento de um ponto pertencente ao tubo secundário segundo o eixo z-z (U3), em que os valores obtidos foram retirados com base na simulação numérica.

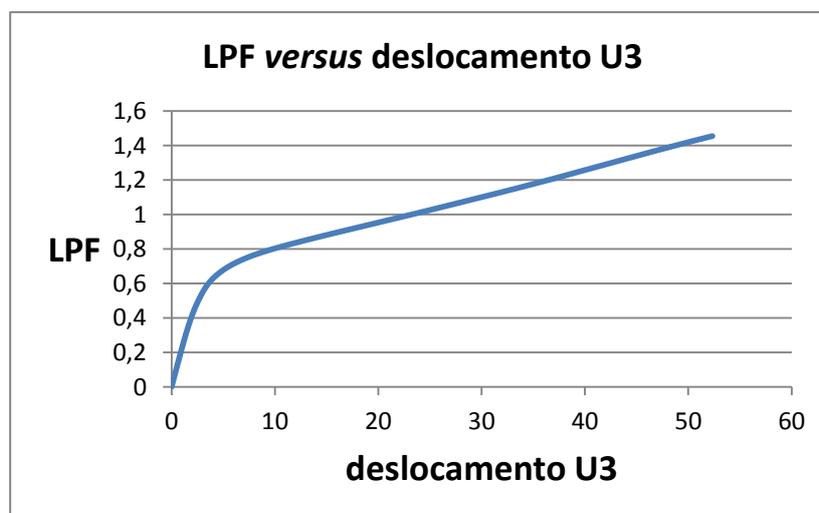


Figura 125 – Resultado da análise não linear com plasticidade – Variação do factor de carga proporcional LPF versus deslocamento

Capítulo 4 – Simulação numérica pelo MEF

Pela análise da figura anterior verifica-se um aumento pronunciado do factor de carga em função do deslocamento até ao valor de factor de carga igual a 0,7. A partir deste valor a curva passa a ter uma tendência crescente em função do valor de deslocamento, não chegando no entanto a entrar na fase de colapso.

4.2.4.2 Análise não linear – Aço S275-J2H

Realizou-se uma segunda análise não linear com plasticidade pelo método de Riks, utilizando uma curva de comportamento de material de um aço S275 J2H, obtida a partir de um ensaio de tracção efectuado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

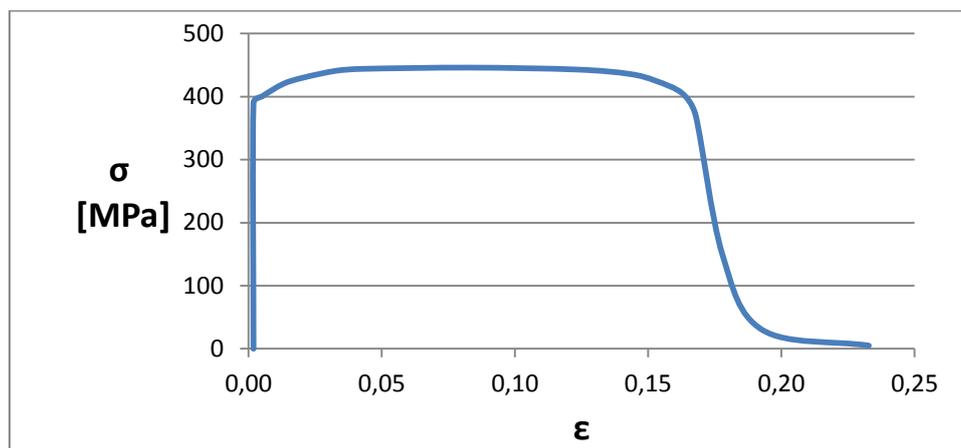


Figura 126 – Curva de comportamento do aço S275 J2H

Na figura seguinte mostra-se o provete que foi ensaiado.



Figura 127 – Provete utilizado no ensaio de tracção

Nas figuras seguintes, apresenta-se a variação da distribuição de tensões em função do aumento do factor de carga proporcional (LPF). Verifica-se que as zonas de maior concentração de tensões surgem nos cantos da ligação entre o tubo secundário e o tubo principal, mostrando-se assim que são os pontos críticos da ligação.

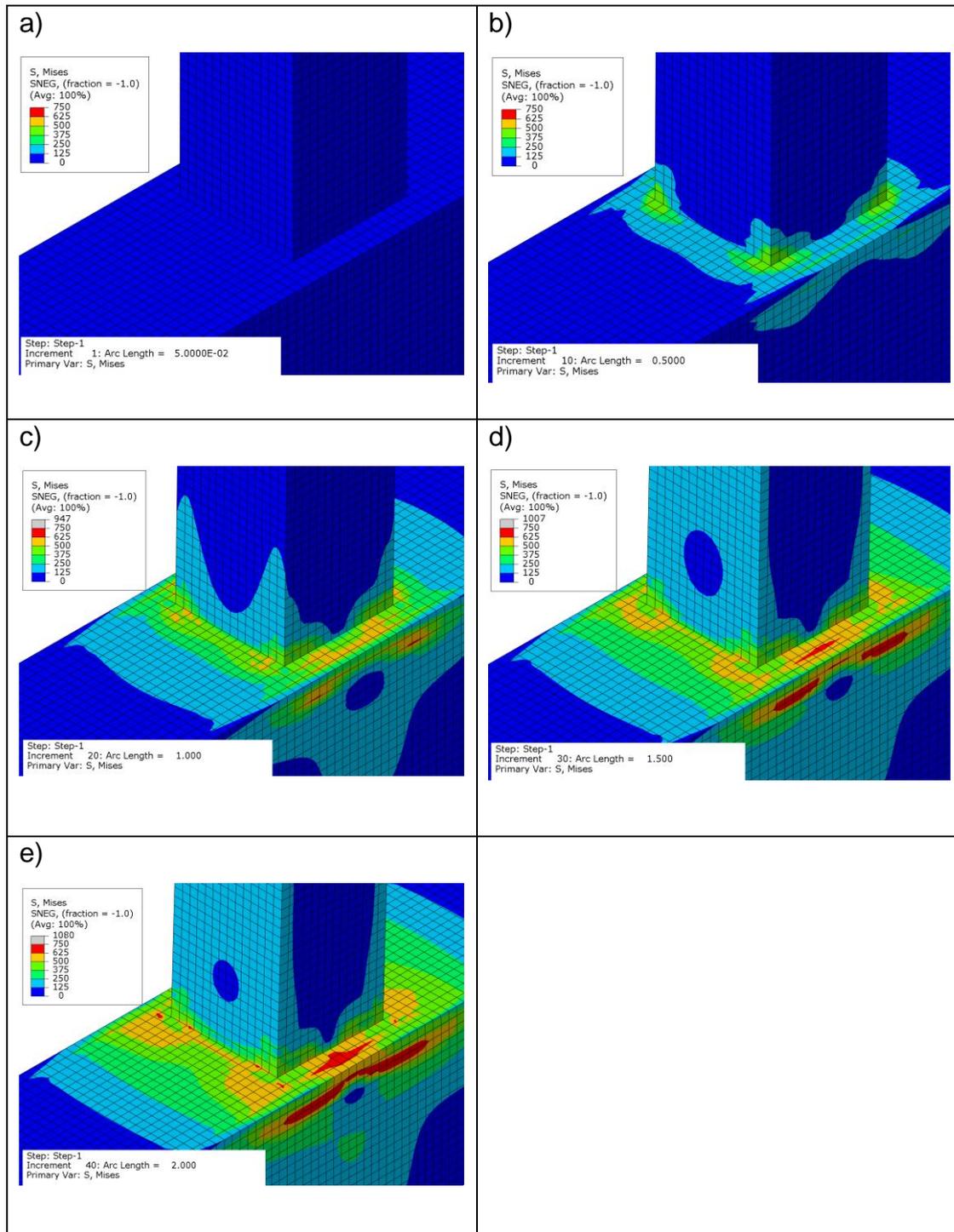


Figura 128 – Resultados da análise não linear com plasticidade: a) Factor de carga = 0; b) Factor de carga = 0.479; c) Factor de carga = 0.789; d) Factor de carga = 0.940; e) Factor de carga = 1.025 – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

Nas figuras seguintes mostra-se a distribuição de tensões na zona de ligação entre o tubo principal e o tubo secundário para o factor de carga proporcional (LPF) igual a um, sendo que para este factor, o valor de carga prescrito no Eurocódigo 3 tem o valor de 800 N·m.

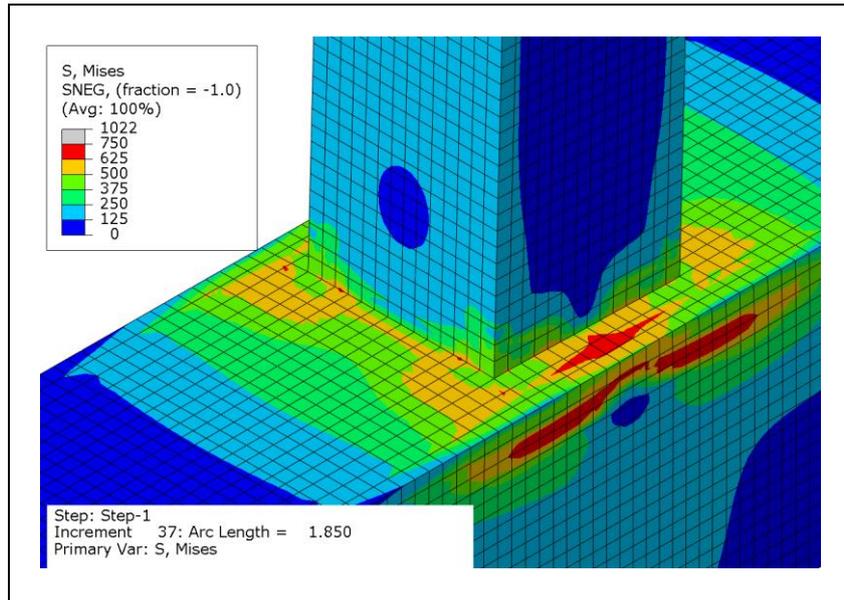


Figura 129 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1 – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

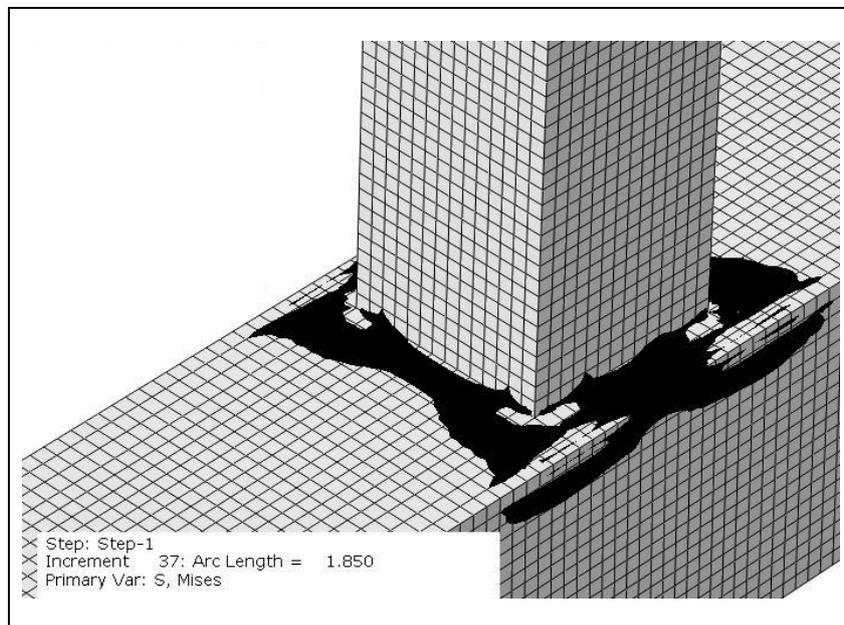


Figura 130 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

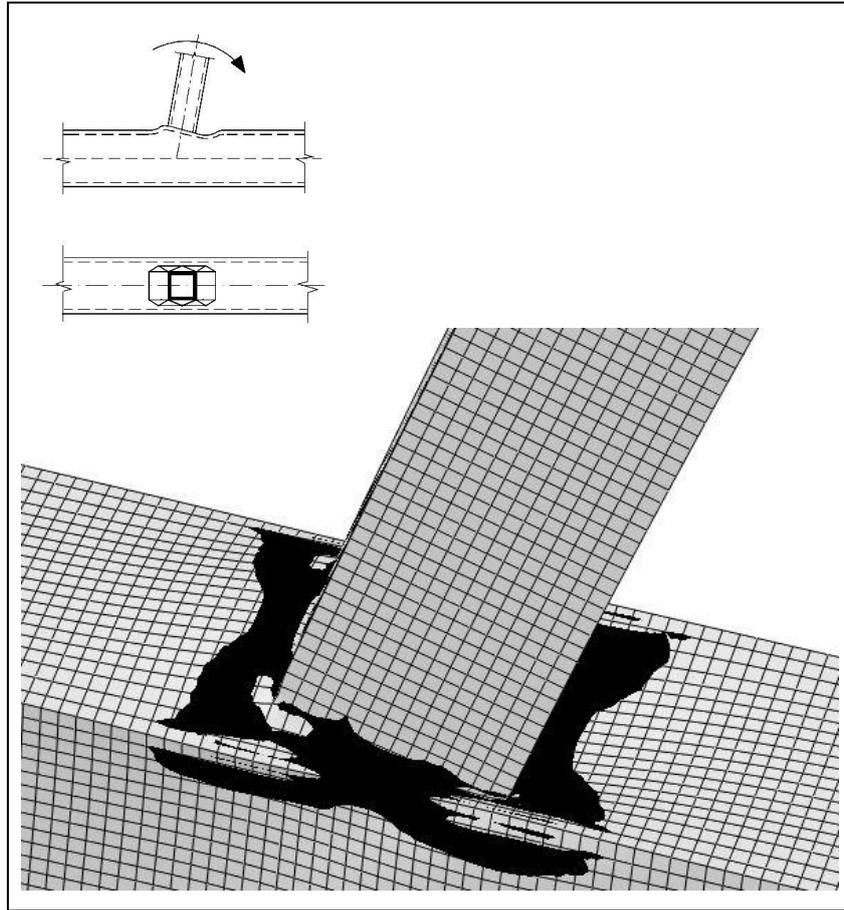


Figura 131 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 10x)

Nas figuras seguintes mostra-se a região onde foi atingida a tensão de cedência do material constituinte que se verificou no final da simulação numérica efectuada, com factor de carga proporcional de 1,295.

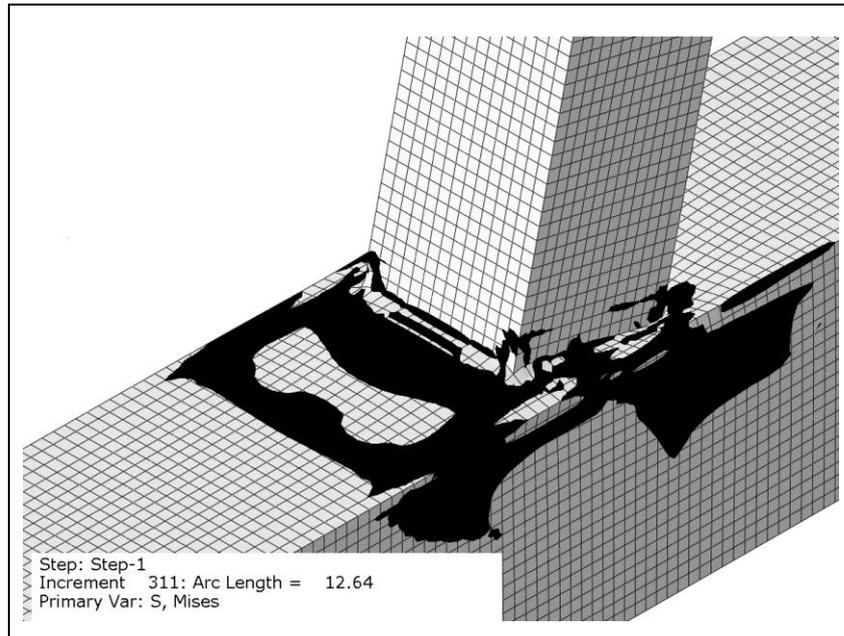


Figura 132 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295, com a região onde foi atingida a tensão de cedência do material, representada a cor preta – (Factor de escala de deformação igual a 1x)

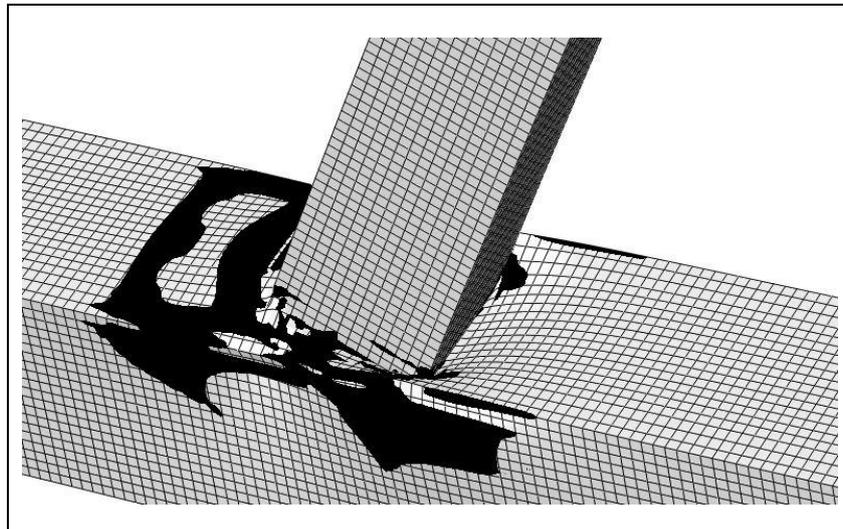


Figura 133 – Distribuição de tensões para Factor de carga proporcional = 1.295 – (Factor de escala de deformação igual a 2x)

Apresenta-se a variação do factor de carga proporcional (LPF) em função do deslocamento de um ponto do tubo secundário segundo o eixo z-z (U3). Os valores que se apresentam foram obtidos a partir da simulação numérica por Elementos Finitos.

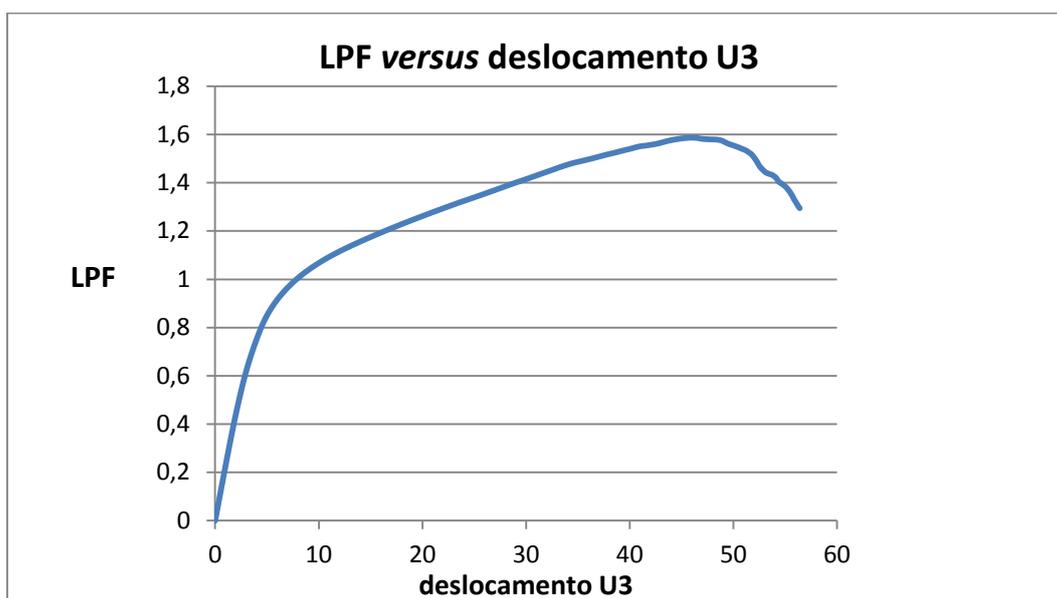


Figura 134 – Resultado da análise não linear com plasticidade – Variação do factor de carga proporcional (LPF) versus deslocamento segundo o eixo z-z de um ponto pertencente ao tubo secundário

Pela análise da figura anterior verifica-se um aumento pronunciado do valor de factor de carga aplicado em função do valor do deslocamento até aproximadamente o valor de 1 (valor de carga recomendado pelo Eurocódigo 3), a partir desse valor verifica-se um aumento gradual do factor de carga até ao valor de 1,60. Para este valor de carga a ligação consegue suportar cerca de 60% acima do valor de carga recomendado pelo Eurocódigo 3, ou seja consegue suportar um momento flector de 1280 N·m, entrando depois na fase de colapso. Esse momento verifica-se com a diminuição do factor de carga em função do valor do deslocamento, tendo o ponto pertencente ao tubo secundário um deslocamento de 44,70 mm na direcção do eixo z-z.

De acordo com as imagens obtidas para o mesmo factor de carga proporcional (LPF) igual a 1 (carregamento indicado pelo Eurocódigo 3), verifica-se que a zona de plastificação do material no caso em que usou o aço S275 J2H é menos extensa do que a zona utilizando uma curva com tensão de cedência de 275 MPa.

5. Conclusões

5.1. Conclusões finais

Sendo o âmbito do estudo desta Dissertação as ligações tubulares da superestrutura de veículos pesados de passageiros, e tendo em conta o tipo de acidentes ocorridos com gravidade com este tipo de veículos, verifica-se que as ligações tubulares devem ser dimensionadas o mais criteriosamente possível, de maneira a poderem resistir a situações de impacto frontal/lateral ou capotamento, minimizando assim os efeitos daí resultantes para os ocupantes.

Neste trabalho foram estudados vários tipos de ligações que existem nos veículos pesados de passageiros, e testaram-se algumas dessas ligações por simulação numérica, tendo-se procurado soluções de melhoria construtiva de modo a aumentar a capacidade resistente das ligações.

A utilização do código comercial de elementos finitos Abaqus[®] revelou-se extremamente eficaz para o cálculo de tensões e deslocamentos.

De acordo com a análise e estudo da selecção de elementos finitos efectuada verificou-se o seguinte:

- Através da análise das tabelas de resultados de deslocamentos e tensões para os diferentes perfis tubulares de secção quadrada, em que se variou o número de elementos por espessura, pode-se concluir que se conseguem bons resultados com os elementos do tipo quadrático de 20 nós (C3D20), mesmo apenas com um único elemento na espessura e com um tempo computacional mais reduzido do que com os elementos do tipo tetraédrico, sendo este o tipo de elemento utilizado nas simulações numéricas tendo em conta o Eurocódigo 3.
- Com o aumento do número de elementos por espessura, verifica-se que os resultados obtidos não convergem para o valor teórico; isto deve-se a não se ter mantido uma relação dimensão máxima/dimensão mínima dentro de valores razoáveis.

As ligações foram escolhidas e analisadas à luz do Eurocódigo 3 e por análise numérica pelo método de elementos finitos verificou-se que as expressões de cálculo para as ligações consagradas pelo Eurocódigo 3 excedem em muito a tensão de cedência do material constituinte das peças tubulares.

Capítulo 5 – Conclusões

Relativamente a estas foram aplicados reforços, por forma a aumentar a sua capacidade resistente, tendo-se obtido os seguintes ganhos:

Para a ligação em T:

- Com a aplicação de reforço em forma de cunha obteve-se um ganho de cerca de 17x relativamente à tensão máxima instalada no modelo sem reforços.
- Com a aplicação de reforço em raio concordante obteve-se um ganho de cerca de 24x relativamente à tensão máxima instalada no modelo sem reforços bem como diminuição gradual da rigidez ao longo do comprimento do reforço.
- Com a ligação entre tubos de igual largura consegue-se transmitir um momento 3x maior, do que com a ligação entre tubos de larguras substancialmente diferentes (quer pela análise segundo o Eurocódigo 3, quer pela análise por elementos finitos).
- Aumentando o factor β (relação entre a largura do tubo secundário e principal), aumenta-se substancialmente a resistência da ligação.

Para a ligação em K:

- Rotura da face da corda – Ganho de cerca de 6x em relação ao modelo sem reforço.
- Corte na Corda – Ganho de cerca de 3x em relação ao modelo sem reforço.
- Rotura do Elemento diagonal – Ganho de cerca de 3x em relação ao modelo sem reforço.
- Punçoamento - Ganho de cerca de 2x em relação ao modelo sem reforço.

Para a junta em cotovelo soldada:

- Com a aplicação de reforço de acordo com o recomendado pelo Eurocódigo 3 obteve-se um ganho de cerca de 2,5x relativamente à tensão máxima instalada no modelo sem reforços.
- Com a aplicação dos reforços em simultâneo obteve-se um ganho de cerca de 3x relativamente à tensão máxima instalada no modelo sem reforços.

Capítulo 5 – Conclusões

Algumas soluções construtivas que foram apresentadas nesta Dissertação, foram aplicadas num ensaio para a homologação de um veículo pesado de passageiros, com muito sucesso, o que se traduziu na não invasão do espaço residual, o que possibilitou a homologação da série ensaiada.

Uma vez que este tipo de ligações tem um papel fundamental no desempenho da superestrutura em determinadas situações de acidente, e para minimizar os efeitos desses acidentes nos ocupantes, a homologação segundo o Regulamento *UNECE R66* de todos os veículos aí referenciados deveria ser obrigatória, mesmo para homologações individuais.

5.2. Propostas para trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros sugerem-se os seguintes temas:

- Modelação de um cordão de soldadura a aplicar às ligações agora estudadas;
- Estudo de ligações com materiais avançados, como por exemplo, materiais compósitos;
- Estudo do comportamento de ligações tubulares durante situações de impacto frontal/lateral;
- Análise não linear com plasticidade para as ligações onde se verificou a ocorrência de tensões muito superiores à tensão de cedência do material;
- Análise de outros tipos de ligações, nomeadamente as de tubo de secções diferentes descentrados.

Referências Documentais

- [1] Manual de Sinistralidade de Veículos pesados de passageiros – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR)
- [2] Manual do Carroçador *ATEGO* da *Mercedes-Benz*
- [3] Apontamentos da disciplina de Estruturas Especiais - Estruturas de Carroçaria e *Chassis* para Veículos pesados de passageiros da autoria do Sr. Eng.º Fernando José Ferreira [2010]
- [4] *Projecto e desenvolvimento de uma superestrutura de carroçaria resistente a ensaio de capotamento* [Setembro de 2010], entidade ISEP
- [5] *ECBOS – Enhanced Coach and Bus Occupant Safety* (Project N° 1999-RD11130), datado de Agosto de 2003
- [6] *Regulamento n° 66* da Comissão Económica para a Europa das Nações Unidas (UNECE) – Prescrições técnicas uniformes aplicáveis à homologação de veículos pesados de passageiros de grande capacidade no que se refere à resistência da superestrutura – datado de 9 de Novembro de 2005
- [7] www.imtt.pt, página consultada no dia 2/07/2012
- [8] Manual da disciplina de Método de Elementos Finitos da autoria do Sr. Eng.º Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho [2010]
- [9] *Abaqus® Analysis User's Manual*, versão 6.11-1
- [10] *NP EN 1993-1-8: 2010* – Eurocódigo 3: Projecto de estruturas em aço - Parte 1.8: Projecto de ligações