

**Determinação do campo de tensões
residuais e distorções resultantes de processos
soldadura recorrendo ao
Sysweld**

Tiago Ramos Lima

Dissertação do MIEM

Orientadores:

Prof. Sérgio Manuel Oliveira Tavares

Prof. Paulo Manuel Salgado Tavares de Castro



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Outubro 2014

Palavras chave

Simulação soldadura, método elementos finitos, tensões residuais, distorções, Sysweld.

Resumo

Esta dissertação trata o problema das distorções e tensões residuais em soldadura, através da sua modelação computacional recorrendo ao software Sysweld.

São focados os aspectos teóricos gerais no capítulo sobre o estado da arte, que levarão à compreensão dos fenómenos físicos e químicos decorrentes dos processos de soldadura abordados. Esse capítulo é iniciado com uma breve história da soldadura, seguida de breves referências a tipos de soldadura usualmente utilizados. É feita referência à transferência de calor em soldadura, à metalurgia do material, finalizando-se com a abordagem às tensões residuais e às distorções derivada da soldadura.

No terceiro capítulo é feita referência às bases da modelação numérica dos modelos em Sysweld.

O caso de estudo realizado consiste na análise de uma soldadura topo-a-topo realizada por arco-eléctrico. O mesmo caso de estudo foi tratado de forma 2D e 3D, sendo examinadas as diferenças entre ambos os casos. No capítulo relativo ao caso de estudo, foi dada especial atenção à elaboração geométrica do modelo, sendo referido constantemente o modo de operação do software, à criação e correcção da malha de MEF, criação de grupos, definição do processo de soldadura, correcção do modelo e visualização de resultados.

Para o caso de estudo 3D foi realizada uma comparação do campo de deslocamentos com o software da ESI Group, Weld Planner. As bases comparativas prendem-se com o facto de se tentarem justificar economicamente a escolha de cada um dos modelos para processamento em ambiente empresarial, atendendo ao tempo de processamento de cada modelo e respectivos resultados.

Foi também realizada a modelação de um caso real, sendo relativo a três conjuntos de chapas de alumínio com recurso a tecnologia laser, realizadas na EDAETECH. Face à parca informação obtida dos parâmetros de soldadura das chapas, o objectivo da implementação desse modelo é o teste de várias condições de fronteira com vista a simular a soldadura real e compreender as alterações do campo de deslocamentos e de tensões residuais para diferentes casos.

Abstract

This dissertation concerns the study of residual stresses and distortions in a butt joint welding, using the computational modeling software Sysweld.

The theoretical aspects are addressed in the state of the art chapter, which will lead to the understanding of the physical-chemical phenomena resulting from the welding processes. This chapter begins with a brief review of the history of welding, followed by brief references to some types of welding commonly used. References to heat transfer in welding, metallurgy of the material are made, ending with the approach to residual stresses and distortions arising from welding.

In the third chapter the basic mathematical formulation of the Sysweld for the multiple welding phenomena is presented.

The case study consists of a butt joint welded by electric arc. This case study was treated in 2D and 3D, and the differences in both cases were examined. The case study section was divided in three chapters: the first and second chapters are related to 2D and 3D models generation in Sysweld and the last chapter refers to 3D model implementation in Weld Planner and displacement field comparison. Special attention was given to the elaboration of the geometric model, with constant reference to the mode of operation of the software, the creation and correction of the FEM mesh, groups creation, definition of the welding process, model correction and post-processing results visualization.

The economic point of view is important when choosing the model. Between models and software, the processing time is completely different, influencing the costs and this is the reason for comparing a simple solution (2D) with a complex solution (3D).

One real case was studied, consisting of three sets of aluminum plates welded using laser technology, (produced at EDAETECH by André Silva). Due to the limited information obtained concerning the welding parameters, the purpose of the implementation of this model is the test of various boundary conditions in order to simulate real welding and understand the changes of the displacement field and residual stresses for different cases.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Prof. Sérgio Tavares e Prof. Paulo Tavares de Castro pelo auxílio disponibilizado na elaboração desta dissertação.

Agradecimento à *ESI Group Hispania*, em especial a Mariano Esparcia Arnedo pela disponibilidade do esclarecimento de dúvidas relativas ao *software*.

Agradecimento a André Filipe Botelho Pereira Pinto pelo apoio prestado na execução das actividades práticas desta dissertação e a André Silva pelo fornecimento das chapas de liga de alumínio ensaiadas na EDAETECH.

Índice de Conteúdos

Palavras chave.....	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Agradecimentos	ix
Índice de Conteúdos	xi
Índice de Figuras	xiv
Índice de Tabelas	xxiii
Lista de acrónimos	xxviii
Lista de símbolos	xxix
1. Introdução	1
1.1. Geral.....	1
1.2. Especificações do componente.....	2
1.3. Objectivos	2
1.4. Organização e Temas Abordados no Presente Relatório	3
2. Estado da arte	4
2.1 História da Soldadura.....	4
2.2 Tipos de Soldadura	5
2.2.1 Soldadura por pressão (estado sólido)	6
2.2.2 Soldadura por fusão	9
2.3 Soldadura Laser de Alumínio	13
2.3.1 Conceitos gerais.....	13
2.3.2 Soldadura laser de ligas de alumínio.....	14
2.3.3 Defeitos.....	16
2.3.4 Tipos de lasers	17
2.3.5 Vantagens e Desvantagens	19
2.4 Fontes de calor em soldadura.....	20
2.4.1 Fontes de energia usadas em soldadura de fusão	20
2.4.2 Tipos de fontes de calor.....	23
2.4.3 Calor gerado por arco eléctrico	24
2.4.4 Dissipação do calor de soldadura.....	24
2.4.5 Análise matemática – Concepções básicas	26
2.4.6 Efeito da forma da fonte de calor	27
2.4.7 Constantes físicas.....	30

2.4.8	Desenvolvimento de modelos matemáticos	31
2.4.9	Zona termicamente afectada – considerações na modelação matemática	31
2.4.10	Factores que influenciam a zona termicamente afectada.....	32
2.5	Metalurgia de soldadura.....	32
2.5.1	Influência da dureza na soldadura	34
2.5.2	Zona termicamente afectada (ZTA)	35
2.5.3	Soldabilidade dos materiais	36
2.5.4	Solidificação do cordão de soldadura, origem de fissuras.....	36
2.5.5	Fissuração devida ao hidrogénio	37
2.5.6	Tratamentos térmicos.....	37
2.6	Tensões residuais e distorções	38
2.6.1	Tensões residuais.....	38
2.6.2	Tensões residuais soldadura topo a topo.....	40
2.6.3	Tensões residuais resultantes de soldadura de corte	41
2.6.4	Distorções	41
2.6.5	Processos de soldadura e distorção.....	44
2.6.6	Determinação de distorções de tensões residuais.....	45
2.6.7	Controlo de distorções	47
2.6.8	Correcção de distorções	47
2.6.9	Desenvolvimentos recentes	48
3.	Fundamentos de Sysweld	52
3.1	Weld Planner.....	52
3.1.1	Tipos de formatos	53
3.1.2	Calibração do Weld Planner.....	54
3.2	Sysweld.....	55
3.2.1	Geometria e malha MEF	55
3.2.2	Interligação dos fenómenos físicos.....	56
3.2.3	Transferência de calor por condução na peça.....	56
3.2.4	Transferência de calor da tocha durante o processo de soldadura	57
3.2.5	Alterações microestrutura.....	58
3.2.6	Modelo estrutural	61
3.2.7	Modelos matemáticos	64
4.	Caso de estudo	75
4.1	Caso de estudo 2D.....	78
4.1.1	Lista de partes	78
4.1.2	Pré-processamento do modelo.....	79
4.1.3	Processamento do modelo.....	99
4.1.4	Pós Processamento. Visual Viewer / Resultados.....	100
4.2	Caso de estudo 3D.....	128
4.2.1	Lista de partes	128
4.2.2	Pré-processamento do modelo.....	128
4.2.3	Processamento do modelo.....	149
4.2.4	Pós Processamento. Visual Viewer / Resultados.....	149
4.3	Erros comuns em Sysweld.....	184
4.4	Caso de estudo Weld Planner.....	185

4.4.1	Modelo a submeter para análise.....	185
4.4.2	Funcionamento Weld Planner.....	187
4.4.3	Processamento Weld Planner.....	193
4.4.4	Pós processamento.....	194
4.4.5	Comparação de resultados	199
5.	Caso experimental	203
5.1	Dados fornecidos	203
5.2	Implementação do modelo 3D.....	206
5.3	Campo de deslocamentos.....	209
5.4	Distribuição de deslocamentos.....	212
5.5	Comparação das deformadas	216
5.6	Distribuição de tensões residuais esperadas	219
6.	Conclusões e sugestões para trabalho futuro	224
	Bibliografia	226

Índice de Figuras

Figura 1 - Dependência das tensões residuais e distorções com o grau de fixação da peça, [1]	1
Figura 2 - Tipos de soldadura segundo a norma BS 499 1991, [5]	5
Figura 3 - Processo soldadura laser, [11]	13
Figura 4 - Absorção de radiação dos materiais função do comprimento de onda do laser, [11]	14
Figura 5 - Modos de operação soldadura laser, [19]	15
Figura 6 - Esquema modo de transferência keyhole, [12]	15
Figura 7 - Penetração típica modo de condução, [12]	16
Figura 8 - Defeitos típicos ocorridos em soldadura laser, adaptado de [12]	17
Figura 9 - Absorção da radiação dos materiais, função do comprimento de onda e do tipo de laser, [11]	18
Figura 10 - Exemplo de soldadura laser híbrida, [11]	19
Figura 11 - Distribuição de temperaturas após aplicação de uma fonte de energia numa placa espessa, [14]	20
Figura 12 - Espectro da densidade energética das fontes de calor de soldadura por fusão, [14]	21
Figura 13 - Fusão do material função da intensidade calorífica e do tempo de interacção, [14]	21
Figura 14 - Velocidade máxima de soldadura função da intensidade de calor e do diâmetro da fonte de calor, [14]	22
Figura 15 - Dimensão da zona termicamente afectada em função da intensidade energética, [14]	22
Figura 16 - Fonte de calor cónica, [17]	23
Figura 17 - Fonte de calor soldadura laser, [15]	23
Figura 18 - Fonte de calor arco-eléctrico, [16]	23
Figura 19 - Equivalente térmico do poder eléctrico do arco eléctrico, [13]	25
Figura 20 - Distribuição de temperaturas numa chapa a ser soldada, [13]	26
Figura 21 - Ciclos térmicos dos processos de soldadura, [20]	27
Figura 22 - Exemplo de perfil de temperaturas na secção transversal da chapa, [20]	28

Figura 23 - Exemplo de perfil de temperaturas na superfície da chapa, [20]	28
Figura 24 - Ciclos térmicos das temperaturas à superfície da chapa, [20]	28
Figura 25 - Soldadura topo a topo, [21].....	29
Figura 26 - Distribuição temporal de temperaturas ao longo de Y, [21]	29
Figura 27 - Distribuição de temporal de temperaturas ao longo de X, [21]	29
Figura 28 - Difusibilidade térmica do aço ao carbono e alumínio, [13]	30
Figura 29 - Condutividade térmica do aço ao carbono e alumínio, [13]	30
Figura 30 - Diagrama de fase Fe-C, [22]	32
Figura 31 - Estrutura cristalina dos metais, [22].....	33
Figura 32 - Percentagem de martensite relativamente à percentagem de carbono, [22]	33
Figura 33 - Dureza de Vickers em função do arrefecimento, [22]	34
Figura 34 - Zonas afectadas resultantes da soldadura, [22]	35
Figura 35 – Fissuras em zona termicamente afectada numa soldadura de canto, [22].....	36
Figura 36 - Solidificação do cordão de soldadura, [22].....	36
Figura 37 - Ensaio de tracção em provetes contendo presença ou não de hidrogénio, [22]	37
Figura 38 - Expansão e contracção livre de uma esfera de metal, [24]	39
Figura 39 - Expansão e contracção restringida de uma esfera de metal, [24]	39
Figura 40 - Expansão e contracção de um cordão de soldadura, [24]	39
Figura 41 - Tensões residuais ao longo do cordão e soldadura a) e ao longo da largura da peça b), [24]	40
Figura 42 - Regiões plastificadas de acordo com tensões residuais, [25]	40
Figura 43 - Tensões residuais resultantes do processo de corte por chama, [24].....	41
Figura 44 - Encolhimento longitudinal e transversal, [24]	42
Figura 45 - Distorção angular, [24]	42
Figura 46 - Distorção rotacional, [26]	42
Figura 47 – Flexão, [24]	43
Figura 48 – Encurvadura, [24]	43
Figura 49 – Torção, [24].....	43
Figura 50 - Influência da velocidade de soldadura no campo térmico, [24]	44
Figura 51 - Sequência de soldadura para minimizar distorções, [24].....	45
Figura 52 - Determinação de distorções e tensões residuais em soldadura, [23]	46
Figura 53 - Soldadura topo a topo arco eléctrico e modelação MEF, [27].....	48
Figura 54 - Tensões residuais axiais, [27]	48

Figura 55 - Tensões residuais transversais, [27].....	49
Figura 56 - Modelo elaborado em MEF, [29].....	49
Figura 57 - Soldadura em chapas finas, [29]	49
Figura 58 - Tensões residuais longitudinais para análise MEF de elevadas deformações, [29]	50
Figura 59 - Medição de tensões residuais em provetes de soldadura por fricção, utilizando método da difracção por raios X e por neutrões, [28]	50
Figura 60 - Distribuição de tensões residuais, [21]	51
Figura 61 - Modelos de engenharia dos softwares de soldadura da ESI Group, [1]	52
Figura 62 - Exemplo de cordões de soldadura com temperaturas impostas (método da contração), [30]	53
Figura 63 - Calibração através da zona plasticamente deformada, [30]	54
Figura 64 - Interligação de fenómenos físicos Sysweld, [31]	56
Figura 65 - Condutividade térmica estrutura cúbica de faces centradas γ e estrutura cubica de corpo centrado α , [31].....	57
Figura 66 - Método da fonte de calor equivalente	57
Figura 67 - Fontes de calor duplo-elipsóide e feixe cónico de distribuição Gaussiana, [31] ...	58
Figura 68 - Gráfico tempo-temperatura para aquecimento contínuo, [31]	59
Figura 69 - Formação de fases químicas provenientes de uma estrutura austenítica, função da taxa de arrefecimento, [31]	59
Figura 70 - Recristalização no alumínio, [31]	60
Figura 71 - Ciclos térmicos diferentes para obtenção das mesmas propriedades de dureza, [31]	60
Figura 72 - Relação entre tensão de cedência, dureza de liga de alumínio AlMgSi em estado endurecido e desestabilizado, [31].....	62
Figura 73 - Ensaio de dilatométrica, [31]	62
Figura 74 - Fonte térmica feixe, [34]	66
Figura 75 - Condições de fronteira aplicados à modelação numérica de soldadura laser, [38]	67
Figura 76 - Deformação termo-metalurgica, [34].....	69
Figura 77 - Entalpia em função da mudança de fase, [34]	72
Figura 78 - Comportamento da tensão de cedência função da proporção de ferrite, [34]	73
Figura 79 - Dimensões das chapas utilizadas no caso de estudo	75
Figura 80 - Propriedades do aço S355J2G3 para deformação a quente, [2].....	77
Figura 81 - Perspectiva final do caso de estudo 2D.....	78
Figura 82 - Pontos gerais do caso de estudo 2D	79

Figura 83 - Criação da superfície inicial.....	80
Figura 84 - Pontos auxiliares	81
Figura 85 - União dos pontos auxiliares #1	81
Figura 86 - União do cordão da referência do cordão de soldadura	81
Figura 87 - Criação de circunferência de refinamento da envolvente do cordão de soldadura	82
Figura 88 - Eliminação do excesso da circunferência	82
Figura 89 - Divisão da superfície de referência em várias divisões	83
Figura 90 - Geração da malha de MEF em metade do cordão de soldadura	84
Figura 91 - Parâmetros da malha MEF cordão de soldadura #2.....	84
Figura 92 - Parâmetros da malha MEF cordão de soldadura #1	85
Figura 93 - Geração de malha MEF zona envolvente cordão de soldadura	85
Figura 94 - Parâmetros malha MEF zona transição para periferia da peça #1	86
Figura 95 - Parâmetros malha MEF zona transição para periferia da peça #2	86
Figura 96 - Parâmetros da malha MEF periferia da peça	87
Figura 97 - Duplicação dos elementos 2D do cordão de soldadura	87
Figura 98 - Aspecto dos elementos 2D do cordão de soldadura.....	88
Figura 99 - Malha MEF final do caso de estudo 2D.....	88
Figura 100 - Nós coincidentes	89
Figura 101 - Qualidade da malha MEF #1	89
Figura 102 - Qualidade da malha MEF #2	90
Figura 103 - Barra de selecção	90
Figura 104 - Geração de grupo de elementos 2D para definição das propriedades do material	91
Figura 105 - Grupo de elementos 2D referentes ao cordão de soldadura.....	91
Figura 106 - Grupos individuais criados	92
Figura 107 - Editor de grupos.....	92
Figura 108 - Geração de área de transferência de calor por convecção	93
Figura 109 - Trajectória de soldadura.....	94
Figura 110 - Assistente de soldadura, descrição do projecto	94
Figura 111 - Assistente de soldadura, parâmetros globais	95
Figura 112 - Assistente de soldadura, atribuição de propriedades do material	95
Figura 113 - Assistente de soldadura, definição de parâmetros de soldadura #1	96
Figura 114 - Assistente de soldadura, definição processo de soldadura #2.....	96

Figura 115 - Assistente de soldadura, definição de parâmetros de soldadura #3	96
Figura 116 - Assistente de soldadura, atribuição de área de transferência de calor	97
Figura 117- Assistente de soldadura, atribuição das condições de fixação	97
Figura 118 - Assistente de soldadura, parâmetros de processamento	98
Figura 119 - Opções de processamento	99
Figura 120 - Processamento finalizado com sucesso	100
Figura 121 - Escolha do processamento a realizar	100
Figura 122 - Barra de animação	101
Figura 123 - Menu animação	101
Figura 124 - Menu Contour	102
Figura 125 - Espectro de resultados	102
Figura 126 - Campo de temperaturas para o instante máximo de penetração do cordão	103
Figura 127 - Definição de caminho de perfil	103
Figura 128 - Caminhos criados para extracção de resultados	103
Figura 129 - Geração de gráficos	104
Figura 130 - Perfil de temperaturas para o instante de penetração máximo ao longo da largura da placa	104
Figura 131 - Nós seleccionados para estudar as variações de temperatura em função do tempo de soldadura	105
Figura 132 - Variação temporal das temperaturas para os nós seleccionados	105
Figura 133 - Cordão de soldadura máximo para as condições definidas inicialmente	106
Figura 134 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após efectuada a primeira tentativa de correcção	107
Figura 135 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após realizada a 2ª tentativa de correcção	107
Figura 136 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após 3ª iteração	108
Figura 137 - Dimensão máxima do cordão de soldadura corrigido	108
Figura 138 - Campo térmico ao longo da largura da placa para instante de penetração máximo do cordão de soldadura. Modelo calibrado	109
Figura 139 - Escolha de fase química	110
Figura 140 - Escolha de fase química para elaboração de gráficos	112
Figura 141 - Elemento 2D do cordão de soldadura escolhido para análise química	112
Figura 142 - Variação das fases químicas ao longo do processo de soldadura	113
Figura 143 - Menu de selecção de página	114
Figura 144 - Espectro de tensões residuais	114

Figura 145 - Caminhos para extracção de resultados e cores representativas nos gráficos ...	117
Figura 146 - Caminho escolhido para extracção das tensões residuais yy e respectiva cor das curvas dos gráficos	119
Figura 147 - Caminho ao longo da espessura seleccionado para extracção do valor das tensões residuais yy	121
Figura 148 - Caminhos escolhidos para extracção dos valores das tensões residuais xx e respectiva cor nos gráficos	123
Figura 149 - Caminho para extracção dos valores das tensões residuais xx ao longo da espessura e respectiva cor nos gráficos	125
Figura 150 - Translação dos pontos gerais	129
Figura 151 - Superfícies gerais da placa	129
Figura 152 - Divisão da placa	130
Figura 153 - Zona de refinamento do cordão de soldadura	131
Figura 154 - Zonas de refinamento longitudinal	132
Figura 155 - Introdução de zonas de refinamento transversal	133
Figura 156 - Modo de visualização Smooth Wireframe	134
Figura 157 - Divisão das linhas de selecção	134
Figura 158 - Superfícies divididas	135
Figura 159 - Malha de MEF para zona do cordão de soldadura	135
Figura 160 - Parâmetros malha MEF cordão de soldadura	136
Figura 161 - Elementos 2D gerados no cordão de soldadura	136
Figura 162 - Malha MEF zona envolvente ao cordão	137
Figura 163 - Elementos 3D zona envolvente ao cordão de soldadura	137
Figura 164 - Elementos 3D zona periferia	138
Figura 165 - Cópia dos elementos gerados ao longo das secções da peça	138
Figura 166 - Malha elementos finitos final	139
Figura 167 - Nós coincidentes	139
Figura 168 - Qualidade dos elementos 3D da malha MEF	140
Figura 169 - Vista para selecção de todos os elementos 3D ao longo do plano normal ao da selecção do cursor do rato	141
Figura 170 – Resultado da selecção	141
Figura 171 - Selecção dos nós para cordão de soldadura	142
Figura 172 – Selecção dos nós para condições de fixação	142
Figura 173 - Elementos 3D referentes a camadas laminares da malha MEF	143
Figura 174 - Conjunto de elementos 3D referentes a 1/3º da peça	143

Figura 175 - Área de transferência de calor 1	144
Figura 176 - Área de transferência de calor 2.....	144
Figura 177 - Trajectória de soldadura.....	145
Figura 178 - Secções de corte ao longo do comprimento da placa	150
Figura 179 - Campo térmico no topo da chapa num instante durante a realização da soldadura	152
Figura 180 - Distribuição de temperaturas no topo e na base da placa ao longo da largura desta, para o instante de penetração máximo. Modelo calibrado.	154
Figura 181 - Campo térmico no topo da placa durante o processo de soldadura. Modelo calibrado.	154
Figura 182 - Nós escolhidos para realizar a análise temporal das temperaturas nodais	155
Figura 183 - Variação temporal da temperatura dos nós escolhidos	155
Figura 184 - Elemento 3D seleccionado para análise das proporções de fase química	157
Figura 185 - Variação das fases químicas ao longo do tempo de soldadura	160
Figura 186 - Secções de corte definidas para análise de tensões residuais	163
Figura 187 - Caminhos para extracção de resultados de tensões residuais ao longo do cordão de soldadura	178
Figura 188 - Caminho superficial transversal ao cordão de soldadura.....	181
Figura 189 - Caminho superficial longitudinal ao cordão de soldadura.....	181
Figura 190 - Modelo importado do Visual Mesh	185
Figura 191 - Conversão dos Collectors em Groups	186
Figura 192 - Exportar ficheiro com extensão .ASC	186
Figura 193 - Tipo de processamento Weld Planner.....	187
Figura 194 - Importar modelo.....	187
Figura 195 - Grupos repetidos	188
Figura 196 - Eliminação de grupos repetidos	188
Figura 197 - Geração do cordão de soldadura	189
Figura 198 - Cordão de soldadura gerado.....	189
Figura 199 - Parâmetros de soldadura Weld Planner	189
Figura 200 - Propriedades do material Weld Planner.....	190
Figura 201 - Propriedades dos fixadores Weld Planner	190
Figura 202 - Condição de fixação após soldadura	192
Figura 203 - Definição da sequência de soldadura	192
Figura 204 - Sequência de soldadura	193

Figura 205 – Salvar modelo Weld Planner	193
Figura 206 - Tipo de análise do modelo	194
Figura 207 - Gerar ficheiro em formato .pc	194
Figura 208 - Menu Contour Visual Viewer. Selecção de resultados	195
Figura 209 - Distorção final da placa. Condição de fixação 1. Análise não linear	196
Figura 210 - Distorção final da placa. Condição de fixação 1. Análise linear	196
Figura 211 - Distorção final da placa. Condição de fixação 2. Análise não linear	197
Figura 212 - Distorção final da placa. Condição de fixação 2. Análise linear	197
Figura 213 - Distorção final da placa. Condição de fixação 3. Análise não linear	198
Figura 214 - Distorção final da placa. Condição de fixação 3. Análise linear	198
Figura 215 - Provetes ensaiados	203
Figura 216 - Vista lateral dos provetes	204
Figura 217 - Condições de realização do ensaio experimental #1	205
Figura 218 - Condições de realização do ensaio experimental #2	205
Figura 219 - Modelo 3D do caso experimental	206

Índice de Tabelas

Tabela 1- Ensaios computacionais a serem realizados	2
Tabela 2 - Características da soldadura por resistência, [4]	6
Tabela 3 - Características da soldadura por forjagem, [4]	7
Tabela 4 - Características da soldadura por resistência de alta frequência, [4]	7
Tabela 5 - Características da soldadura oxiacetileno, [4]	7
Tabela 6 - Características da soldadura por pressão a frio, [4].....	8
Tabela 7 - Características da soldadura por fricção, [8]	8
Tabela 8 - Características da soldadura por explosão, [4]	8
Tabela 9 - Características da soldadura por ultra-som, [4]	9
Tabela 10 – Características da soldadura por difusão	9
Tabela 11 - Características da soldadura arco-elétrico, [4].....	10
Tabela 12 – Características da soldadura arco-submerso, [4]	10
Tabela 13 – Características da soldadura MIG-MAG, [4]	10
Tabela 14 - Características da soldadura TIG, [4]	11
Tabela 15 – Características da soldadura plasma, [10].....	11
Tabela 16 - Características soldadura por feixe de electrões, [4]	12
Tabela 17 – Características da soldadura laser, [4]	12
Tabela 18 - Características dos tratamentos térmicos, [22]	38
Tabela 19 - Condições de fixação do caso de estudo	77
Tabela 20 - Coordenadas dos pontos gerais do caso e estudo 2D	79
Tabela 21 - Coordenadas dos pontos auxiliares do caso de estudo 2D	80
Tabela 22 - Campo de fase química para o instante final de soldadura	111
Tabela 23 - Evolução das distorções vs tensões residuais (condição de fixação 1)	115
Tabela 24- Tensões residuais zz ao longo da largura da peça	118
Tabela 25 - Tensões residuais yy ao longo da largura da placa.....	120
Tabela 26 - Tensões residuais yy ao longo da espessura da placa.....	121
Tabela 27 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da largura da placa	123

Tabela 28 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da espessura da chapa	125
Tabela 29 - Comparação dos valores das deformadas com razão de ampliação 2x para três instantes de tempo e várias condições de fixação	127
Tabela 30 - Coordenadas gerais dos pontos para translação	128
Tabela 31 - Coordenadas dos pontos de auxílio para divisão da placa	130
Tabela 32 - Coordenadas dos pontos para criação da zona do cordão de soldadura	131
Tabela 33 - Coordenadas dos pontos de auxílio para criação de zona de refinamento longitudinal	132
Tabela 34 - Coordenadas dos pontos auxiliares para refinamento transversal	133
Tabela 35 - Etapas 1, 2, 3, 4 e 9 do assistente de soldadura	146
Tabela 36 - Etapa 5 assistente de soldadura	147
Tabela 37 - Etapa 6 assistente de soldadura	148
Tabela 38 - Campos térmicos para o instante de penetração máximo, com parâmetros de soldadura do caso 2D	151
Tabela 39 - Campos térmicos em função da largura da placa. Sem calibração do modelo.	151
Tabela 40 - Campos térmicos no instante de penetração máxima para as duas secções de corte. Com calibração do modelo.	153
Tabela 41 - Distribuição ao longo da largura da placa das temperaturas no instante máximo de penetração para as diferentes áreas de transferência de calor consideradas	156
Tabela 42 - Proporções das fases químicas para o instante final de soldadura	158
Tabela 43 - Evolução das distorções e tensões residuais ao longo do processo de soldadura	161
Tabela 44 - Distribuição de tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 1	164
Tabela 45 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 1	166
Tabela 46 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo da espessura da placa, condição de fixação 1	167
Tabela 47 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 1	168
Tabela 48 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da espessura, condição de fixação 1	169
Tabela 49 - Distribuição das tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 2	170
Tabela 50 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 2	171
Tabela 51 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da espessura, condição de fixação 2	172

Tabela 52 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 2.....	172
Tabela 53 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da espessura da placa, condição de fixação 2.....	173
Tabela 54 - Distribuição de tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 3.....	174
Tabela 55 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 3.....	175
Tabela 56 - Distribuição de tensões residuais ao longo da espessura da placa, condição de fixação 3.....	176
Tabela 57 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 3.....	177
Tabela 58 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da espessura da placa, condição de fixação 3.....	178
Tabela 59 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo do cordão do comprimento da peça	179
Tabela 60 - Comparação das deformações para o instante final da simulação	180
Tabela 61 - Magnitude dos deslocamentos normais da placa para as três condições de fronteira.....	182
Tabela 62 - Condições de fixação em Weld Planner	191
Tabela 63 - Comparação resultados campo de deslocamentos transversal ao cordão de soldadura.....	199
Tabela 64 - Comparação de resultados longitudinal ao cordão de soldadura.....	201
Tabela 65 - Dados fornecidos dos ensaios experimentais	204
Tabela 66 - Parâmetros de soldadura dos modelos dos casos experimentais, Sysweld	207
Tabela 67 - Condições de fixação do modelo experimental.....	208
Tabela 68 - Campo de deslocamentos Ensaio I	209
Tabela 69 - Campo de deslocamentos Ensaio VII.....	210
Tabela 70 - Campos de deslocamentos Ensaio VIII	211
Tabela 71 - Deslocamentos normais Ensaio I.....	212
Tabela 72 - Deslocamentos normais Ensaio VII	213
Tabela 73 - Deslocamentos normais Ensaio VIII	214
Tabela 74 - Deformadas Ensaio I, factor de ampliação 25x.....	216
Tabela 75 - Deformadas Ensaio VII, factor de ampliação 25x.....	217
Tabela 76 - Deformadas Ensaio VIII, factor de ampliação 25x	218
Tabela 77 - Tensões residuais zz e yy Ensaio I	220

Tabela 78 - Tensões residuais zz e yy , Ensaio VII	221
Tabela 79 - Tensões residuais zz e yy , Ensaio VIII.....	222

Lista de acrónimos

AWS – *American Welding Society*

BCC – *Body Centre Cubic*

CAD - *Computer-Aided Design*

EUA – Estados Unidos da América

FCC – *Face Centre Cubic*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

MEF – Método dos elementos finitos

MIG/MAG – *Metal Inert gas/Metal active gas*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

RSEW - *Resistance Seam Welding*

RU – Reino Unido

SPUG - *Streamline Upwind Petrov Galerkin*

TIG - *Tungsten Inert Gas*

URSS – União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

ZTA – Zona termicamente afectada

Lista de símbolos

Variáveis latinas

BPP – produto do parâmetro laser

C_p – calor específico

D - diâmetro antes do foco

d – profundidade de soldadura

d_1 – factor de distribuição da densidade de potência da fonte de calor

E – corrente

f - distância focal

H – taxa de calor

h_{eff} – coeficiente térmico efectivo

I – tensão eléctrica

k – condutividade térmica

K_0 – função de Bessel

P – potência

p – coeficiente de dilatação térmica

\bar{p} – proporção de fase química

Q – calor

Q_c – perdas de calor por convecção; entalpia da solução metastável.

Q_d - energia de activação do processo de difusão do elemento de liga menos móvel.

Q_r – perdas de calor por radiação

Q_s – calor induzido pela fonte laser

R – distância da fonte de calor a um ponto

r – raio da fonte térmica feixe cónico

r_{eff} – raio efectivo do feixe laser

$T,$ – temperatura

v – velocidade

x – fracção dissolvida do precipitado

Variáveis gregas

α - metade do ângulo de divergência

ε - deformação

η - rendimento

η_c - coeficiente de absorção da chapa

λ - comprimento de onda

ν - coeficiente de Poisson

ρ - densidade

σ - tensão

χ - factor de recristalização

ω_0 - raio de cintura do laser

1. Introdução

1.1. Geral

O estudo das tensões residuais e distorções em soldadura é vital para assegurar a qualidade e segurança das ligações soldadas.

As diferentes variações de temperatura ao longo da peça durante o processo de soldadura, originam variações de geometria não uniformes na estrutura. Estas variações apresentam-se maioritariamente sob forma de distorções e contracções, conduzindo igualmente ao surgimento de tensões residuais. Por sua vez, estas apresentam uma dependência estreita com as deformações, sendo maiores com o aumento das restrições da movimentação da peça, Figura 1.

Não existindo a capacidade da eliminação total desses efeitos, procuram-se portanto métodos para o seu controlo e atenuação. A forma mais económica para controlar estes inconvenientes é a prevenção, procurando antecipar o comportamento da peça durante a operação de soldadura, e a correcção dimensional durante o processo, diminuindo o risco de ocorrerem fissuras e distorções que limitam a utilização do componente em causa.

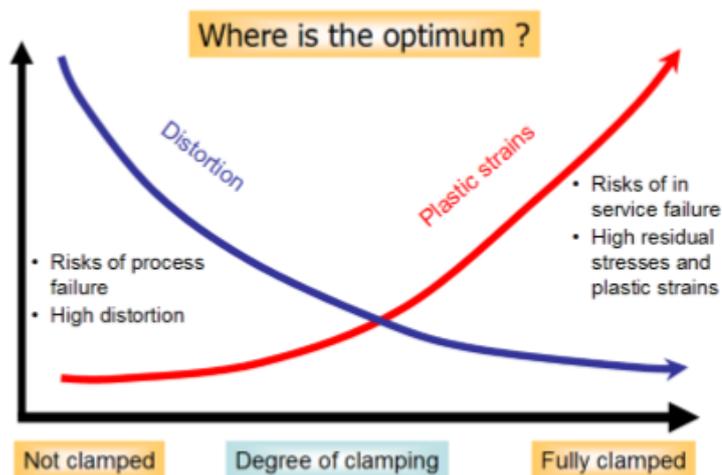


Figura 1 - Dependência das tensões residuais e distorções com o grau de fixação da peça, [1]

Os avanços na área da computação numérica nas últimas décadas conduziram a um enorme crescimento na análise de soldaduras por via de método dos elementos finitos, sendo desta forma possível prever o comportamento das peças a soldar. Comportamento este que

está directamente relacionado com várias áreas da física e da química como é o caso da transferência de calor, metalurgia e mecânica.

1.2. Especificações do componente

A dissertação compreende a análise de um caso de estudo, composto por soldadura de arco-eléctrico em chapas de aço S355J2G3, [2]. Este caso de estudo terá uma abordagem 2D e outra 3D. Também serão abordados três casos experimentais realizados em laboratório, sendo todos estes compostos por soldadura laser e chapas de alumínio (liga AA5XXX e AA6XXX). Os casos experimentais visam compreender o comportamento da soldadura laser em chapas de alumínio para diferentes ligas e espessuras.

O critério adoptado para a atribuição dos nomes dos ensaios experimentais prende-se com a referência utilizada em laboratório no fabrico dos mesmos.

Tabela 1- Ensaios computacionais a serem realizados

Nome do ensaio	Tipo de soldadura	Material	Dimensões (largura x comprimento x espessura) [mm]
Caso de estudo 2D	Arco-eléctrico	Aço S355J2G3	50 x - x 3
Caso de estudo 3D	Arco-eléctrico	Aço S355J2G3	50 x 150 x 3
Ensaio I	Laser	Liga de alumínio AA5083	2 x(20 x 123 x 1)
Ensaio VII	Laser	Liga de alumínio AA5083 e AA6082	(20 x 123 x 1) + (20 x 123 x 0,8)
Ensaio VIII	Laser	Liga de alumínio AA6082	2 x(20 x 123 x 1)

1.3. Objectivos

- Aquisição e complementação de conceitos de tecnologia de soldadura.
- Compreensão dos modelos matemáticos subjacentes ao *software*.
- Implementação e discretização de modelos de soldadura topo a topo em *software Sysweld*.
- Calibração do modelo de soldadura e comparação com o modelo experimental.
- Análise e discussão de tensões residuais, distorções, campo térmico e mudanças de fase em *software Visual Viewer*.
- Comparação de distorções com o resultado do *software Weld Planner*.

1.4. Organização e Temas Abordados no Presente Relatório

Esta dissertação está organizada em nove capítulos sendo o capítulo 1 o da introdução à problemática maior desta dissertação e a exposição dos casos de estudo a realizar. No segundo capítulo é feita referência aos aspectos gerais teóricos em que se fundamenta tipicamente a soldadura.

No terceiro capítulo é feita uma descrição dos *softwares* utilizados na dissertação bem como de alguns modelos matemáticos por detrás da sua concepção.

O capítulo 4 é referente ao caso de estudo. Os seus vários subcapítulos dizem respeito a tutoriais de utilização e análise de resultados de três soluções diferentes para uma chapa de aço com soldadura por arco-eléctrico. É feita uma análise em *Sysweld*, sendo realizada uma abordagem 2D no primeiro caso e 3D no segundo. O caso 3D é também calculado recorrendo ao *software Weld Planner*, sendo feita a comparação do campo de deslocamentos com o obtido em *Sysweld*.

O quinto capítulo é dedicado à implementação e análise de um modelo em *Sysweld* de três chapas de alumínio soldadas pelo processo laser, com diferentes configurações de material e espessura de chapa.

O sexto capítulo expõe às conclusões e os possíveis futuros avanços na temática desta dissertação.

2. Estado da arte

Neste capítulo serão concisamente referidos os conceitos teóricos e tecnológicos que serviram de base à elaboração da tese.

2.1 História da Soldadura

De forma a melhor enquadrar o leitor nos processos de soldadura abordados no trabalho, é importante ter em conta uma linha histórica de acontecimentos na área. De acordo com Howard B.Cary, [3], foi elaborada uma pequena síntese histórica.

Os primeiros indícios de soldadura são datados da Idade do Bronze, consistindo em soldaduras por impacto [3]. Peças ferrosas foram unidas primariamente no antigo Egipto e em civilizações na costa leste do Mediterrâneo [3].

Durante a idade média, a arte da ferraria (soldadura por materlagem) foi aperfeiçoada e largamente utilizada, [3].

A soldadura “contemporânea” tem a sua origem em 1800 com o estabelecimento de um arco eléctrico entre dois eléctrodos de carbono, sendo o feito creditado a Sir Humphry Davy, [3]. Até ao final do século XIX, surge a soldadura e o corte a gás. A primeira patente de soldadura foi obtida por Nikolai N. Benardos e Stanislaus Olszewski em 1885 (RU) e 1887 (EUA). Tal patente continha um dispositivo de fixação do eléctrodo, restringindo-se apenas ao arco eléctrico de carbono, [3]. C.L.Coffin em 1890 patenteou o primeiro sistema de arco eléctrico com eléctrodo metálico, sendo pioneiro na deposição de material de adição na soldadura através do arco eléctrico, [3].

Em 1900, Strohmenger introduziu o eléctrodo de metal revestido, sendo este revestimento de argila ou cal. Durante os primeiros anos do século, foram desenvolvidas as soldaduras por resistência bem como o aperfeiçoamento da soldadura por gás graças à introdução de oxigénio e hidrogénio, [3]. A primeira guerra mundial (1914-1918) impulsionou a evolução da soldadura graças a novos requisitos da indústria aeronáutica, armamento e transportes. No pós-guerra (1919) foi criada a Sociedade Americana de Soldadura (AWS), [3]. No decorrer da década de 1920, foi introduzida a soldadura automatizada por P.O.Nobel. Assistiu-se ao desenvolvimento de vários tipos de eléctrodos e de avanços na soldadura por gás como a soldadura em atmosfera de hidrogénio, argon e hélio. A *Lincoln Electric* iniciou a comercialização ao público de eléctrodos, [3]. Na década de 1930 surge a soldadura por arco-submerso.

A soldadura TIG teve início na década de 1940, derivando de um conceito de C.L.Coffin que remontava a 1890, sendo posteriormente avançada na década de 20 por H.M.Hobart e P.K.Devers. Por seu lado, a soldadura MIG-MAG teve origem em 1948 no Battelle Memorial Institute, sendo patenteada por H.E.Kennedy, [3]. Em 1953, Lyubavskii e

Novoshilov realizaram experiências utilizando eléctrodos consumíveis em atmosfera de CO₂, tornando os processos de soldadura a gás mais económicos.

Desde a década de 1960 até aos dias de hoje os desenvolvimentos tecnológicos permitiram a criação de processos de soldadura mais eficientes e precisos, bem como o aperfeiçoamento dos já popularizados, muito graças ao aperfeiçoamento das fontes de energia e dos materiais utilizados. São casos conhecidos tais como a soldadura por arco plasma (1957), por feixe electrões (1957), soldadura por fricção (desenvolvida na URSS) e mais recentemente a soldadura Laser, [3].

2.2 Tipos de Soldadura

Os diferentes tipos de soldadura podem-se agrupar em três áreas: soldadura por pressão, soldadura de fusão e brasagem [4].

Os processos de interesse abordados nesta dissertação centram-se na soldadura por fusão, essencialmente na soldadura por laser e por arco-eléctrico. No entanto é relevante descrever de forma esquemática alguns dos processos de soldadura, para o leitor obter uma noção geral dos tipos existentes.

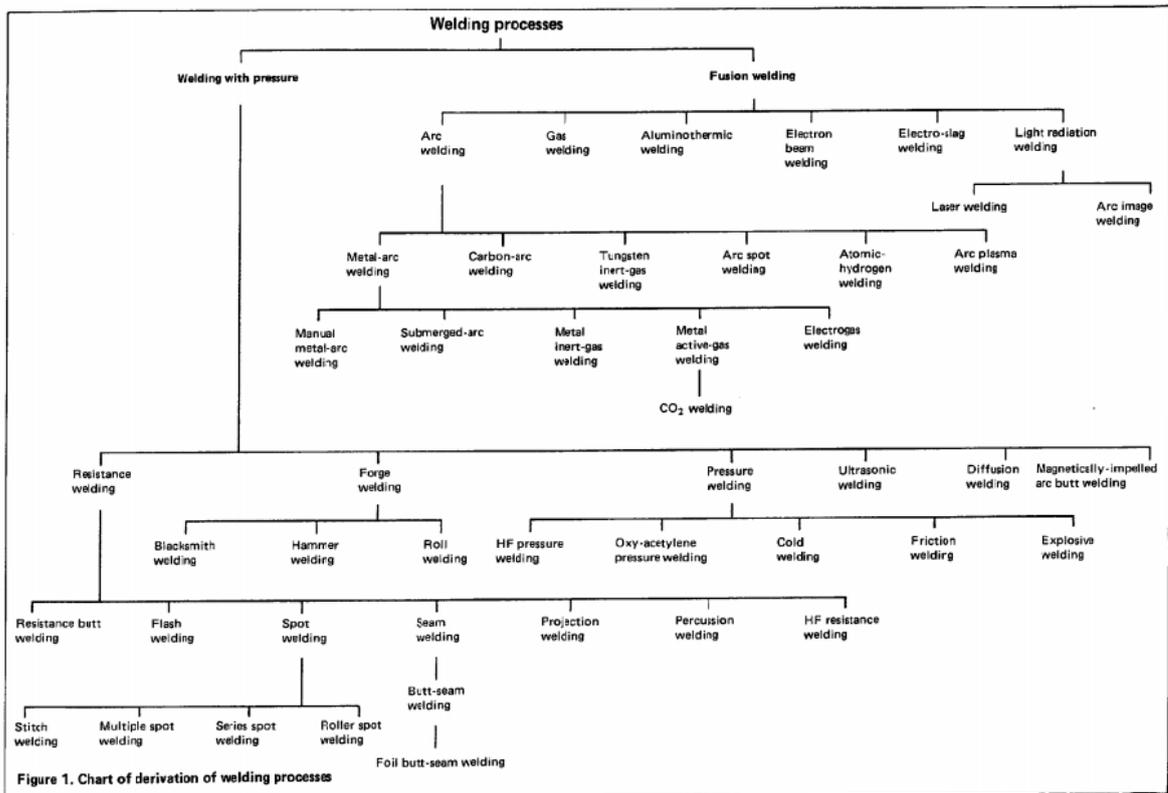


Figura 2 - Tipos de soldadura segundo a norma BS 499 1991, [5]

2.2.1 Soldadura por pressão (estado sólido)

Caracteriza-se pela aplicação de força para união das superfícies. A temperatura ocorre abaixo da temperatura de fusão, [6]. Os processos de ligação neste tipo de soldaduras podem-se dividir entre soldaduras por difusão (ligações atómicas em estado sólido) e por fricção (ligação resultante do aquecimento provocado pela fricção), [7].

Gera soldaduras isentas de defeitos na microestrutura, [6]. As propriedades mecânicas obtidas no cordão de soldadura pouco diferem em relação às do material de base, [6]. É possível desta forma fazer a ligação de materiais dissimilares, [6].

Não são utilizados materiais consumíveis, [6]. Por outro lado, tem o inconveniente de muitos dos processos serem caros e de apresentarem limitações para soldadura com geometria complexa, [6].

2.2.1.1 Soldadura por resistência

Processo: caracteriza-se pela utilização de eléctrodos de material com alta condutividade térmica/eléctrica, [4]. Quando atravessados por alta corrente eléctrica e baixa voltagem, os eléctrodos são pressionados contra as chapas, garantindo assim a sua soldadura [4].

Termicamente o processo é bastante eficiente. A área de soldadura é definida pela área de passagem de corrente eléctrica.

Este processo contém várias variantes: soldadura por pontos; soldadura por projecção e soldadura por resistência RSEW “Resistance Seam Welding”.

Tabela 2 - Características da soldadura por resistência, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Elevada taxa de produção.- Não depende da perícia do soldador.- Baixo custo de manutenção.- Isento de efeitos de condições atmosféricas- Vasta gama de materiais a soldar
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Soldadura de materiais espessos requerem equipamento especial.- Acessibilidade das ligações poderão limitar a implementação do processo.

2.2.1.2 Soldadura por forjagem

Processo: aquecimento das chapas a soldar até ao domínio plástico. Após finalizada essa etapa, a martelagem unirá as superfícies gerando um cordão de soldadura, [4].

Tabela 3 - Características da soldadura por forjagem, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Processo barato.- Não utiliza consumíveis.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Baixa precisão dimensional aliada ao difícil controlo de qualidade.- Limitado a aços de baixo teor de carbono e alguns aços ligados.

2.2.1.3 Soldadura por pressão

De entre as quais possui as variantes, [5] como:

2.2.1.3.1 Soldadura por resistência de alta frequência

Processo: a fonte de alimentação de alta frequência produz uma corrente no processo operativo, induzindo um campo magnético alternante que gerará um aquecimento concentrado no ponto de soldadura [4].

Tabela 4 - Características da soldadura por resistência de alta frequência, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Alta velocidade.- Alta qualidade.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Elevado custo.- Inflexibilidade do processo.

2.2.1.3.2 Soldadura por pressão oxiacetileno

Processo: Citando [4], *Os terminais do componente são aquecidos até à temperatura de plastificação por uma fonte de calor de forma circular. Após o aquecimento a fonte é retirada e é aplicada uma força axial, levando à união dos materiais.*

Tabela 5 - Características da soldadura oxiacetileno, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Equipamento de baixo custo.- Parâmetros não-críticos simples.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Grande zona termicamente afectada.- Limitado na gama de materiais.

2.2.1.3.3 Soldadura por pressão a frio

Processo: As superfícies a unir deverão estar isentas de oxidação, [4]. São pressionadas até consumarem a sua união devido à deformação plástica resultante. Este processo utiliza matrizes para fixação dos elementos, [4].

Tabela 6 - Características da soldadura por pressão a frio, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Capaz de largas soldaduras em materiais com alta condutividade como o cobre.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Limitado a materiais macios.- Elevadas deformações.- Sensível ao estado das superfícies.

2.2.1.3.4 Soldadura por fricção linear

Processo: produz soldaduras através de uma ferramenta rotacional não consumível usada localmente no local da união. Essa ferramenta gera uma mistura de materiais no estado sólido, unindo-os pelo processo de fricção linear, [8].

Tabela 7 - Características da soldadura por fricção, [8]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Baixas temperaturas.- Baixas distorções e tensões residuais.- Poucos ou inexistentes gases de soldadura.- Não afectado por efeitos gravitacionais.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Limitação com variações de espessura e soldaduras não lineares.- Elevado custo do equipamento

2.2.1.3.5 Soldadura por explosão

Processo: a placa-mãe é assente sobre a matriz e a placa móvel é projectada sobre esta através da detonação de explosivos por uma ordem sequencial estabelecida, [4]. A placa móvel está colocada entre 2 a 40° relativamente à placa-mãe, [4]. A explosão gera deformações que ligam ambas as placas. A limpeza das superfícies é assegurada pelos efeitos da explosão, sendo a sujidade projectada para fora da placa, [4].

Tabela 8 - Características da soldadura por explosão, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- União de diferentes tipos de materiais- Grande área de ligação
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Ruído e perigo de explosão- Sem capacidade de rectificação- Requer vasta área de trabalho

2.2.1.4 Soldadura por ultra-som

Processo: A fonte de alimentação produz energia a frequência ultra-sónica. Esta energia é convertida em energia mecânica por um transdutor, [4]. Um transformador mecânico aumenta a amplitude do movimento. Um sistema de carregamento pressiona as peças a unir durante o movimento ultra-sónico, [4]. O movimento é interrompido assim que ocorre o aquecimento

térmico local, mantendo-se a pressão entre as peças durante um pequeno intervalo de tempo, gerando assim a união, [4].

Tabela 9 - Características da soldadura por ultra-som, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Processo limpo. - Grande gama de materiais. - Baixa temperatura.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Limitações de espessura. - Limitações de geometria de junta. - Equipamento dispendioso.

2.2.1.5 Soldadura por difusão

Processo: soldadura que consiste na migração de átomos na junta de ligação das chapas, [9]. Materiais são pressurizados a elevadas temperaturas (abaixo da temperatura de fusão). Processo realizado em vácuo de forma a proteger de contaminações, [9].

Tabela 10 – Características da soldadura por difusão

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Capaz de unir materiais dissimilares. - Grande qualidade de soldadura.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Superfícies necessitam de limpeza. - Baixa produtividade. - Elevado custo do equipamento.

2.2.2 Soldadura por fusão

Tipo de soldadura mais utilizado, [7]. Ocorre fusão no material de base e mistura de materiais o que altera a composição química e a microestrutura. Origina-se uma zona termicamente afectada (ZTA) em volta do cordão de soldadura.

Processos mais comuns:

2.2.2.1 Soldadura arco-eléctrico

Processo: *O arco eléctrico funde a placa de base e o eléctrodo criando um banho de fusão protegido pelo fluxo do arco*, [4]. Processo manual que depende da perícia do operador. Este controla parâmetros como a taxa de alimentação do eléctrodo e a posição do mesmo de forma a tentar manter o arco constante, [4].

Tabela 11 - Características da soldadura arco-eléctrico, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo do equipamento. - Usado em soldaduras de difícil acesso.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Limitado essencialmente a materiais ferrosos. - Processo moroso. - Dependente da perícia do operador.

2.2.2.2 Soldadura arco-submerso

Processo: envolve fontes de alimentação com grande intensidade de corrente. Eléctrodo protegido por um revestimento granuloso que acompanha o cordão de soldadura, [4]. Após a soldadura, este revestimento origina a escória, [4]. *A alimentação do eléctrodo consumível é feita de forma a manter constante o comprimento do arco e a taxa de deposição*, [4]. O revestimento granulado em excesso poderá ser reutilizado.

Tabela 12 – Características da soldadura arco-submerso, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Elevadas taxas de deposição. - Boa qualidade de soldadura. - Arco protegido visualmente pelo fluxo granulado.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de remover a escória. - Dificuldade em usar em posições diferentes de vertical ou horizontal. - Força de impacto do material fundido tende a ser baixa.

2.2.2.3 Soldadura MIG-MAG

Processo: *o arco é mantido entre a extremidade do eléctrodo consumível e a zona trabalho*, [4]. O material de adição é alimentado a velocidade constante e o comprimento do arco é controlado pela fonte de potência, permitindo assim que o operador apenas tenha que concentrar na forma da deposição do material de adição (processo semi-automático), [4]. O arco e o banho de fusão são protegidos por gás inerte (MIG) ou gás activo (MAG), [7].

Há várias formas de transferência de material de adição, dependendo da intensidade de corrente a utilizar.

Tabela 13 – Características da soldadura MIG-MAG, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Processo contínuo. - Velocidade de soldadura. - Facilmente automatizável
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de atmosfera estável. - Definição dos parâmetros de soldadura.

2.2.2.4 Soldadura TIG

Processo: contém eléctrodo de tungsténio não consumível e arco protegido por gás inerte, [7]. Operador necessita de controlar o comprimento do arco e a taxa de alimentação do material de adição, [4]. Em caso de utilização de material de adição, este é manuseado manualmente sendo usualmente introduzido no banho de fusão, [4].

Tabela 14 - Características da soldadura TIG, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Boa qualidade das soldaduras (incluindo alumínio).- Grande gama de materiais.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Necessidade de operador especializado.- Processo mais lento que MIG-MAG.- Radiação ultravioleta emitida.

2.2.2.5 Soldadura Plasma

Processo: semelhante ao processo TIG, [10]. O arco eléctrico é restringido por um pequeno orifício passando o plasma em forma de feixe a altas velocidades e elevadas temperaturas, [10]. De acordo com [10], *o plasma é ionizado após passagem de corrente eléctrica, tornando-se condutor de electricidade.*

Há várias variantes deste processo, dependendo do formato da tocha, do eléctrodo e parâmetros de soldadura utilizados.

Tabela 15 – Características da soldadura plasma, [10]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Maiores velocidades de soldadura do que TIG.- Maior concentração de energia.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Custo do equipamento.- Procedimentos de soldadura mais complexos.

2.2.2.6 Outros processos:

Soldadura feixe de electrões

Processo: a zona de trabalho é bombardeada por um feixe de electrões originados por um emissor de electrões, levando ao aquecimento dessa região [4]. O processo é efectuado em vácuo, de forma a prevenir a dispersão dos electrões, [4].

Tabela 16 - Características soldadura por feixe de electrões, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Grande penetração.- Elevadas velocidades de soldadura.- Grande gama de materiais.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Custo elevado do equipamento.- Emissão de raios-x.- Limitações dimensionais das peças a soldar

Soldadura Laser

Processo: um feixe luz de uma única cor é gerado e direccionado para um único ponto através de uma lente, [4]. Esse feixe direccionado para a placa de base originará o seu aquecimento e conseqüente fusão. O feixe poderá ser contínuo ou pulsado. O uso de material de adição é opcional, [4].

Para um maior detalhe consultar subcapítulo do estado da arte: 2.3.

Tabela 17 – Características da soldadura laser, [4]

Vantagens	<ul style="list-style-type: none">- Boa qualidade de soldadura.- Baixa quantidade de calor aplicada.- Menores distorções.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none">- Alto custo do equipamento.- Reflexão do feixe laser poderá causar lesões.

2.3 Soldadura Laser de Alumínio

2.3.1 Conceitos gerais

Citando [11], a soldadura a laser é um processo de soldadura em que a energia proveniente da radiação é usada para produção do calor que levará à fusão dos materiais a soldar.

Um feixe de luz monocromática é direccionado por intermédio de aparelhos ópticos para um determinado ponto de foco na região a soldar, [11]. Geralmente é utilizado gás de protecção para prevenir a oxidação do material fundido, bem como o aparecimento de certos defeitos no mesmo, [11].

Podem ser soldados diferentes materiais, sem a necessidade de envolver soldadura por contacto. A grande vantagem associada à soldadura laser é o facto de não haver necessidade de adição de material, sendo acompanhada de estreitas zonas de cordão e zona termicamente afectada, [11].

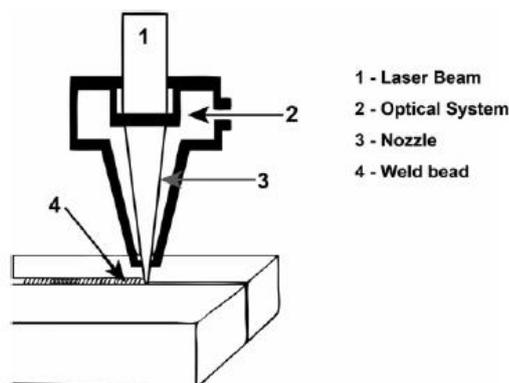


Figura 3 - Processo soldadura laser, [11]

A soldadura laser poderá ser utilizada de diversas formas, como recorrendo a onda pulsada ou a onda contínua, [11]. Há ainda vários tipos de tecnologia de soldadura laser, tais como laser a gás (CO₂), laser estado sólido, laser de fibra óptica e laser híbrido.

Historicamente a soldadura laser teve o seu início de aplicação na indústria dos componentes electrónicos, sendo a soldadura de chapas iniciada no final da década de 70 com a introdução de fontes de potência de elevadas, [11].

Diferentes tipos de laser podem ser aplicados na soldadura de materiais, variando a sua aplicação (comprimento de onda do laser) com o tipo de material a soldar, Figura 4. Cada material é susceptível a absorver mais calor consoante o valor do comprimento de onda utilizado no laser.

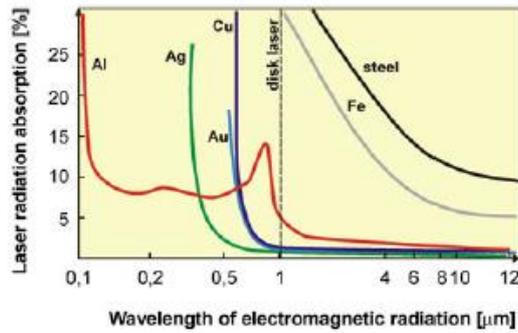


Figura 4 - Absorção de radiação dos materiais função do comprimento de onda do laser, [11]

De acordo com [11], a qualidade do feixe laser é de interesse elevado para processos de soldadura que contenham elevadas fontes de potência. A qualidade é definida pela norma ISO 11146:1999, pelo produto do parâmetro laser (BPP), sendo este a medida da capacidade de foco do feixe laser, [11].

$$BPP = \alpha \cdot \omega_0 \quad (1)$$

Sendo ω_0 (mrad) o raio de cintura do laser e α (mm), metade do ângulo de divergência.

Baixos valores de BPP admitem uma boa qualidade do laser em focar um pequeno ponto de interesse. A qualidade do laser está também dependente do comprimento de onda do mesmo, [11]:

$$d_0 = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (2)$$

sendo d_0 o diâmetro do feixe de foco; D o diâmetro antes do foco; f a distância focal e λ o comprimento de onda.

Soldadura por laser a gás apresenta boa qualidade de feixe laser, sendo superior à soldadura por laser em estado sólido. O laser de fibra óptica tem alcançado os melhores resultados da qualidade de feixe, [11].

2.3.2 Soldadura laser de ligas de alumínio

Na soldadura de ligas de alumínio há várias limitações, entre as quais se destacam o facto de o alumínio ser um bom reflector de luz e o facto de muitos dos materiais presentes nas ligas de alumínio serem facilmente vaporizáveis (formando plasma que bloqueia o feixe laser incidente), [11]. Há também que ter em conta o baixo poder de absorção do alumínio, as

diferenças de composição das suas ligas e a importância da preparação das superfícies a soldar.

As variações do poder de absorção do alumínio causam instabilidades no processo de soldadura, gerando baixa penetração e superfície rugosa, [11].

A soldadura de alumínio poderá ser feita por condução ou por keyhole, Figura 5, [11].

A forma do banho de fusão da soldadura laser de alumínio depende da intensidade do feixe laser e do tempo de pulsação do mesmo.

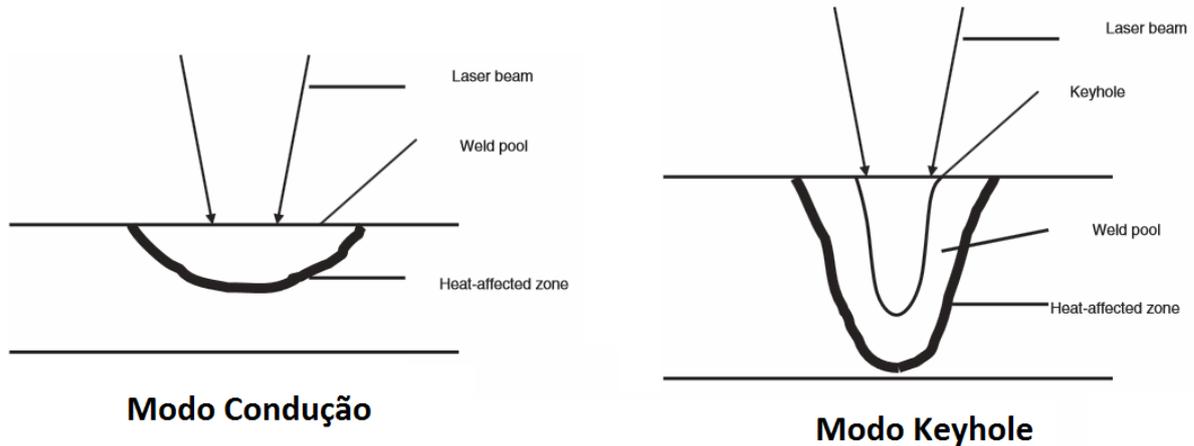


Figura 5 - Modos de operação soldadura laser, [19]

É durante a fase de arranque do processo de soldadura onde se geram maiores dificuldades devido à elevada reflexão de radiação do alumínio, [11]. À medida que o material é fundido, o coeficiente de absorção aumenta, facilitando a soldadura.

Soldadura por condução: o feixe laser aquece a superfície da peça e conseqüentemente a energia resultante desse processo é transferida para o resto da peça, [12]. Utilizado para materiais de pequena dimensão como componentes electrónicos. Utiliza fontes de baixa potência. Modo de operação envolvendo um laser pouco potente.

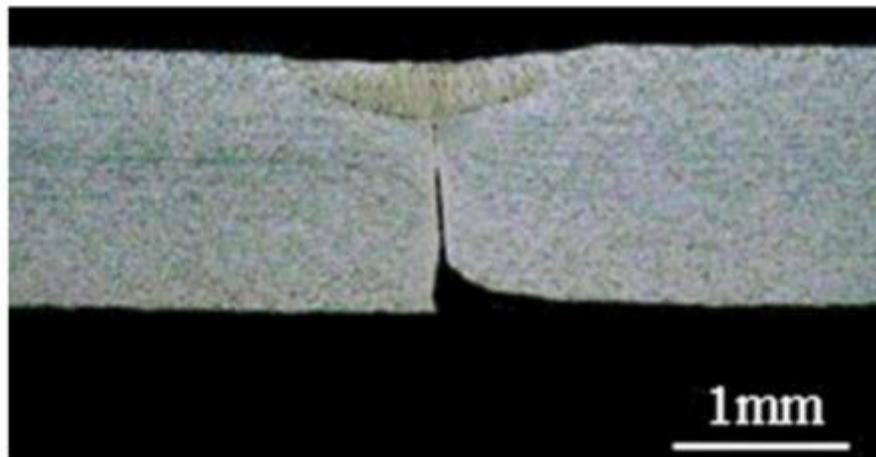


Figura 6 - Esquema modo de transferência keyhole, [12]

De acordo com [11], a soldadura por *Keyhole*: método de soldadura laser mais utilizado. É necessário que a densidade da fonte de potência do laser seja tal que ultrapasse o valor da densidade de potência que conduz à formação de uma camada de gases e vapores de metal, rodeado por uma fina película de metal fundido, Figura 5. A radiação do feixe laser é absorvida pela atmosfera de vapores de metal, devido às reflexões aí ocorrentes.

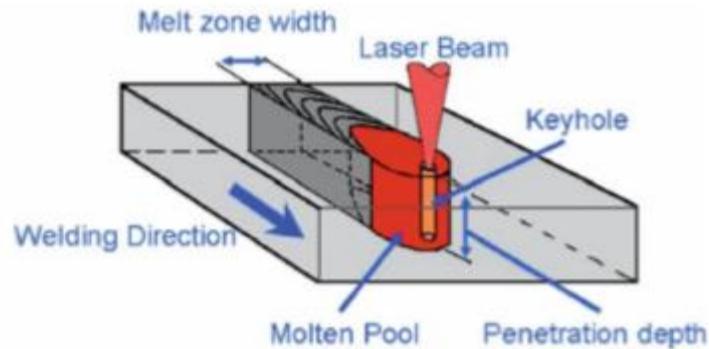


Figura 7 - Penetração típica modo de condução, [12]

O processo de absorção na soldadura de alumínio é muito mais instável do que na soldadura de aço, já que apesar das temperaturas de vaporização nas paredes do *keyhole* serem semelhantes entre materiais, as suas temperaturas de fusão são muito diferentes. Tudo isto acompanhado do maior coeficiente de expansão térmica do alumínio, gera um banho de fusão maior do que na soldadura de aço, sendo a movimentação desse banho de fusão um aspecto de grande importância na soldadura do alumínio, [11].

Devido à maior reflexão do alumínio, há a necessidade de usar maiores potências de laser. No uso de lasers de baixo poder, há uma probabilidade acrescida de haver reflexão do mesmo para áreas exteriores à de trabalho. Tal poderá originar riscos para o utilizador, bem como a possibilidade de danificar o aparelho de soldadura, [11].

2.3.3 Defeitos

Há a possibilidade de ficarem vapores presos na região junto à raiz do cordão de soldadura durante o processo *Keyhole*, Figura 6. O hidrogénio apresenta tendência a ficar bloqueado nessa zona devido à enorme diferença de valores de solubilidade que o caracterizam na presença do alumínio sólido e líquido. O uso de gás de protecção é benéfico para solucionar este problema, [11].

Outro defeito preocupante é a existência de poros, sendo estes gerados quer pela presença de hidrogénio na peça, quer pela vaporização de vários elementos de liga. A forma de contornar o problema será a maquinagem da peça (com os inconvenientes conhecidos) ou submeter a peça a um recozido a vácuo.

As fissuras por solidificação geram-se predominantemente na região confinada entre a zona termicamente afectada e o cordão de soldadura. Aí as tensões de compressão devidas à solidificação são maiores, ocorrendo segregação dos grãos da microestrutura. Os alumínios da série 6000 são mais susceptíveis a este tipo de falha, [11].

Defeito	Esquema
Fissuras	
Porosidade	
Falta de penetração	
Falta de fusão	
Desalinhamento	
Rebaixamento	
Reforço/Concavidade raiz do cordão	
Cratera superficial	

Figura 8 - Defeitos típicos ocorridos em soldadura laser, adaptado de [12]

A Figura 8 demonstra os tipos de defeitos que podem ocorrer em soldaduras laser. Para serem detectados muitos destes defeitos são geralmente realizados ensaios destrutivos.

2.3.4 Tipos de lasers

Laser CO₂ é um laser a gás que emite comprimentos de onda de 10,6 μm. É caracterizado pelas altas potências de saída e pela sua eficiência de cerca de 20%. Apresenta uma boa qualidade de feixe, todavia é de difícil manutenção caso a luz não seja transportada por fibra óptica, [11].

São usados essencialmente no processo *keyhole* como para soldadura de placas espessas.

Laser Nd-YAG: Laser em estado sólido que emite comprimentos de onda na casa dos 1,06 μm, Figura 9. Essa é a faixa de radiação onde a maioria dos materiais metálicos apresenta uma boa absorção de energia, Figura 9, permitindo para a mesma penetração do cordão de soldadura uma potência inferior ao laser de CO₂, [11].

É contudo um laser limitado quanto à sua potência de saída. Pode ser conduzido por intermédio de fibra óptica.

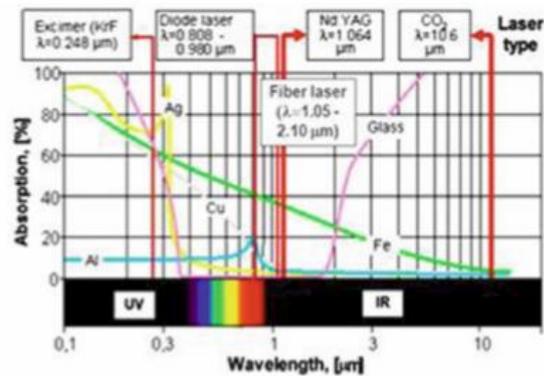


Figura 9 - Absorção da radiação dos materiais, função do comprimento de onda e do tipo de laser, [11]

Laser de fibra: Surgiram na década de 60 com fontes de baixa potência e no início do presente século sob a forma de fontes de potência de alta potência, [11].

São lasers de alta eficiência, compactos, com boa qualidade de feixe e diminuto diâmetro de foco.

Citando [11], *o modo de bombeamento consiste em vários díodos, sendo o laser emitido na direcção longitudinal ao longo das fibras. Dois gradeamentos de Bragg limitam o comprimento de onda do feixe laser.*

Os lasers de fibra são modulares, de modo que são capazes vários lasers de fibra integrados num único equipamento. Assim estes lasers conseguem ser mais eficientes do que um laser de feixe único e conseguem comprimentos de onda inferiores, [11].

Laser de disco: são lasers em estado sólido tecnologicamente mais recentes.

O elemento activo destes dispositivos contém um cristal YAG em forma de disco sendo excitado pela luz de um laser de díodo. O feixe laser gerado por um laser de díodos é emitido sobre o cristal, originando-se um ponto de foco. É possível controlar o comprimento de onda do feixe a emitir. A pouca espessura do disco de cristal conduz a uma porção da radiação absorvida, sendo a restante reflectida (pela outra face do disco) e redireccionada para o disco através de um sistema de espelhos. Devido à geometria do cristal, o feixe laser é emitido apenas na direcção ao longo do eixo óptico de ressonância. A qualidade do feixe é muito pouco dependente da potência do laser, [11].

A sua eficiência ronda os 25%.

Laser híbrido: também chamado de processo Laser-MIG, é a junção de dois processos de soldadura laser num só, Figura 10. O uso de material de adição (via processo MIG) é benéfico para colmatar as propriedades dos elementos de liga vaporizados no alumínio. De acordo com [11], *combinando estes dois processos conseguem-se maiores penetrações, maiores velocidades de soldadura, acompanhados de uma baixa entrega térmica e baixa distorção.* Pode ser utilizado gás de protecção de forma a estabilizar o arco. O maior problema serão os vários parâmetros de soldadura em jogo, sendo um problema acrescido já que se estão a lidar com dois processos de soldadura, [11].

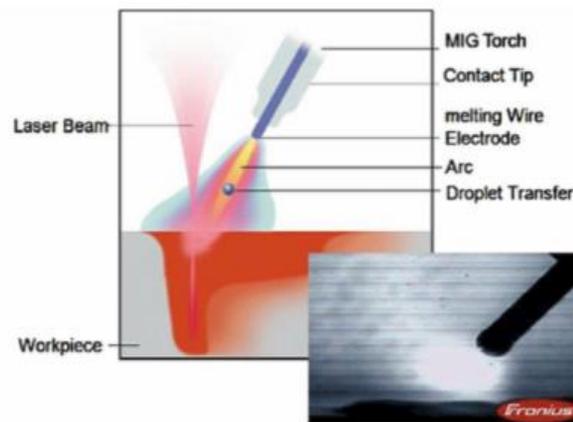


Figura 10 - Exemplo de soldadura laser híbrida, [11]

2.3.5 Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens dos processos de soldadura a laser são de acordo com [11]:

- Geometria do cordão de soldadura
- Boa penetração
- Elevada precisão
- Boas propriedades mecânicas da junta
- Alta velocidade de soldadura
- Possibilidade de automatização
- Baixa entrega térmica.

Feixes laser com elevada densidade de energia permitem profundidades elevadas para cordões estreitos, conduzindo a zonas termicamente afectadas reduzidas e a baixas deformações.

As principais desvantagens resumem-se a, [11]:

- Elevado custo do equipamento
- Parâmetros de ajuste rigoroso
- Baixa eficiência do processo.

Relativamente às ligas de alumínio, *a soldabilidade varia muito com as propriedades químicas do material*, [11].

2.4 Fontes de calor em soldadura

Segundo [13], o calor produzido na soldadura de fusão envolve ciclos térmicos complexos, gerando alterações na microestrutura da zona termicamente afectada, tensões de origem térmica e movimentação de material na zona da fusão, causando distorções e tensões residuais na peça.

Há largas décadas que métodos analíticos para resolução de problemas de transferência de calor em soldadura por arco eléctrico têm sido estudados. Apesar de se conseguirem boas aproximações por via analítica comparativamente com os valores obtidos por via experimental, esta precisão diminui consideravelmente quando se procuram analisar alterações de temperatura na zona termicamente afectada e na zona de fusão, [13]. Nas últimas décadas foi possível aumentar a precisão dos métodos de análise de transferência de calor na soldadura, graças à introdução da análise pelo método dos elementos finitos.

2.4.1 Fontes de energia usadas em soldadura de fusão

A intensidade da fonte de calor diferencia os vários processos de soldadura por fusão, [14]. Esta aliada ao tempo de actuação sobre a peça a soldar, irá determinar a dimensão da soldadura e da zona termicamente afectada inerente.

Segundo a Figura 11, para uma fonte de energia com 400 W/cm^2 o metal demora aproximadamente 2 minutos a fundir. Já usando a fonte de energia com 800 W/cm^2 , demora cerca de 1 segundo. Esta elevada entrega térmica vaporiza o metal rapidamente, não sendo então processos de soldadura capazes de serem operados humanamente, [14].

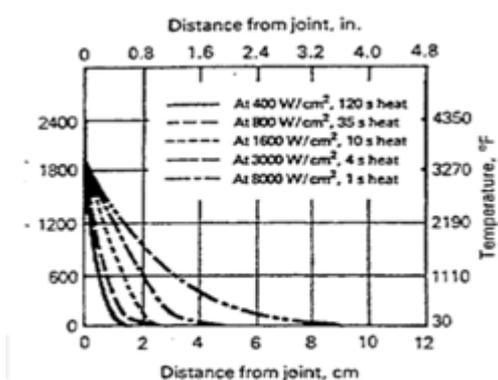


Figura 11 – Distribuição de temperaturas após aplicação de uma fonte de energia numa placa espessa, [14]

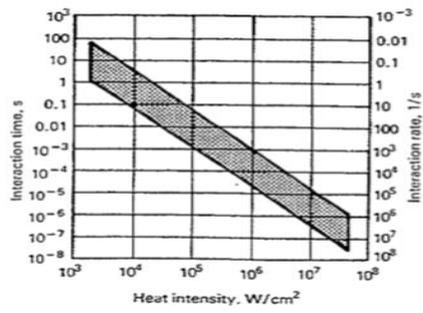


Figura 12 - Espectro da densidade energética das fontes de calor de soldadura por fusão, [14]

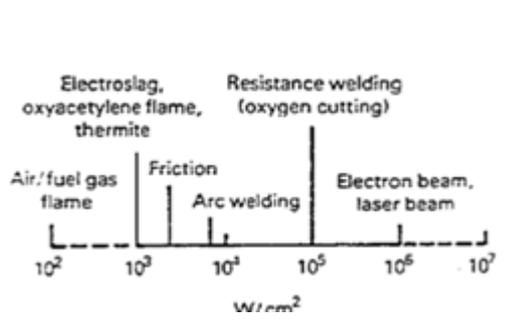


Figura 13 - Fusão do material função da intensidade calorífica e do tempo de interação, [14]

Através da Figura 12 pode-se estimar o tempo de interação de acordo com a intensidade da fonte de soldadura. Para materiais com alta difusibilidade térmica, estes devem figurar no topo do gráfico, usando-se baixas intensidades de calor e elevando tempo de interação, ao passo que materiais com pouca difusibilidade térmica devem estar na parte inferior do gráfico, usando elevadas intensidade energética e pouco tempo de interação, [14].

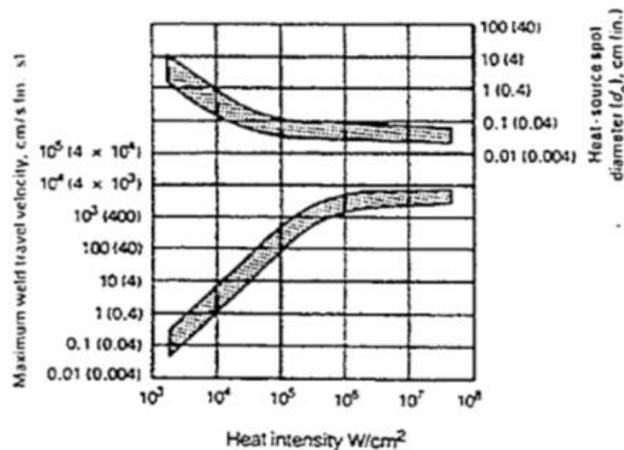


Figura 14 - Velocidade máxima de soldadura função da intensidade de calor e do diâmetro da fonte de calor, [14]

A velocidade máxima de soldadura está dependente do diâmetro da fonte de calor e da intensidade da fonte energética. A relação está presente na Figura 14. Quanto maior a intensidade energética, maiores serão as velocidades de soldadura. Contudo processos de elevada entrega térmica envolvem tecnologia dispendiosa o que limitam de certa forma a sua utilização, [14].

Um outro parâmetro importante na soldadura que é influenciado pela intensidade da fonte de calor é a zona termicamente afectada (ver Figura 15). Esta forma-se durante o aquecimento provocado pela soldadura e para soldaduras que envolvam maior densidade energética, é formada durante o arrefecimento. Para baixos valores de intensidade energética, o crescimento da ZTA depende do tempo de interacção da fonte de calor com o material, [14]. Para elevadas intensidades energéticas, o crescimento da ZTA é independente do tempo de interacção da fonte de calor com a soldadura. Devido à elevada eficiência destes processos, a maior parte do calor introduzido fundirá o metal. Durante o arrefecimento, o calor ao ser removido da zona de fusão irá proporcionar o crescimento da ZTA, [14].

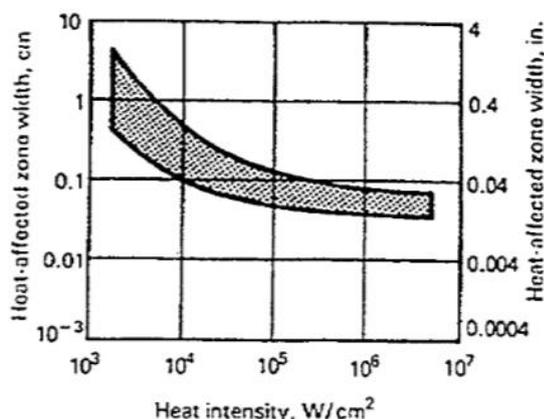


Figura 15 - Dimensão da zona termicamente afectada em função da intensidade energética, [14]

2.4.2 Tipos de fontes de calor

Os diferentes tipos de soldadura envolvem diferentes entregas térmicas e com isso, diferentes tipos de fluxo.

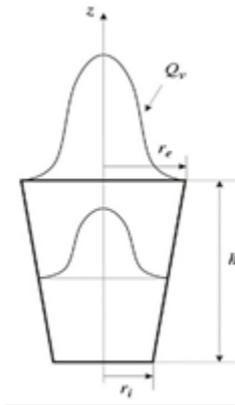


Figura 16 - Fonte de calor cônica, [17]

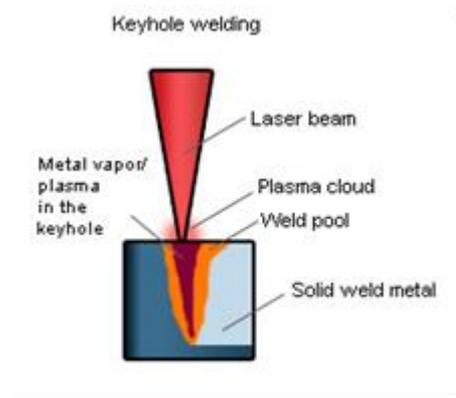


Figura 17 - Fonte de calor soldadura laser, [15]

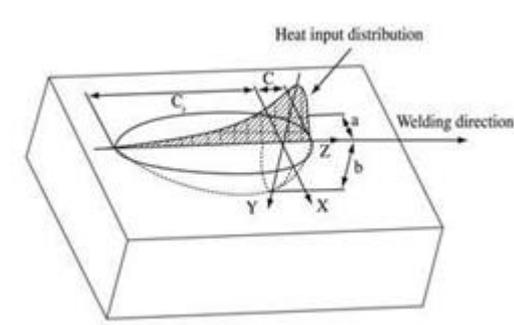


Figura 18 - Fonte de calor arco-elétrico, [16]

O duplo elipsóide, *Figura 18*, é a distribuição de temperatura característica dos processos de arco elétrico. A *Figura 16* apresenta a distribuição Gaussiana de temperaturas de uma soldadura de elevada entrega térmica em formato cônico, enquanto na *Figura 17* está representada a distribuição de temperaturas de um feixe laser, seguindo contudo o esquema da *Figura 16*, [18].

2.4.3 Calor gerado por arco eléctrico

O calor gerado por processos de arco eléctrico tem a sua origem dividida em:

- Calor gerado pela potência eléctrica do arco, [11];

$$H = V * I \quad (3)$$

sendo H expresso em joules por segundo, V em volts e I em amperes.

- Calor gerado por reacções químicas ocorridas nos revestimentos dos eléctrodos, atmosfera do arco e no banho de fusão;
- Calor gerado pela transformação do metal.

A maior proporção do calor gerado provém da potência eléctrica do arco. A energia do arco eléctrico é expressa da seguinte forma, [11]:

$$h = \frac{60 * V * I}{v} \quad (4)$$

sendo h a energia de entrada do arco eléctrico (joules por cm), V a tensão do arco, I a corrente e v a velocidade de soldadura (polegadas por minuto).

2.4.4 Dissipação do calor de soldadura

Citando [13], a dissipação de calor é causada por:

- *Condução térmica da peça soldada;*
- *Condução térmica do eléctrodo;*
- *Radiação para a atmosfera circundante.*

A parte mais expressiva do calor envolvido é fornecido ao material a soldar. Este valor é quantificado sob a forma de “porção do equivalente térmico da potência eléctrica do arco”, expresso em calorias por segundo, [13].

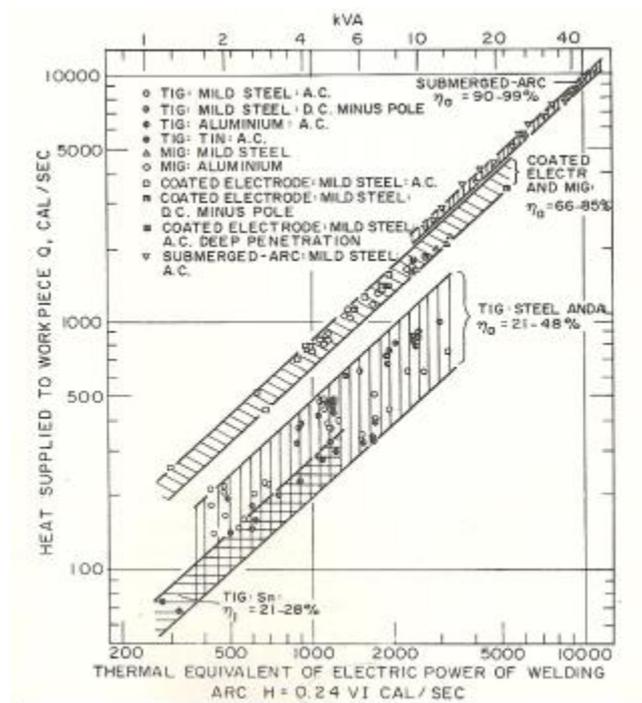


Figura 19 - Equivalente térmico do poder eléctrico do arco eléctrico, [13]

A quantidade de calor (Q , cal/s) fornecido à peça é expresso pela seguinte fórmula, [13]:

$$Q = \eta_a * 0,24 * V * I \quad (5)$$

A eficiência do arco eléctrico é definido pela constante η_a .

Do gráfico da Figura 19 é possível verificar que os processos de arco eléctrico com maior eficiência energética são os processos de soldadura por arco submerso (eficiência de 90-99%) e os de eléctrodo com gás de protecção e eléctrodo revestido (66 a 85%). As perdas energéticas verificadas resultam de zonas aquecidas que não entraram na fase de fusão.

Segundo Feng, [19], a eficiência de alguns processos de soldadura por arco apresentam o seguinte rendimento:

- Arco eléctrico: 70– 85%
- TIG (árgon): 22– 48%
- MIG (árgon): 66– 75%
- Arco Submerso: 90– 99%

2.4.5 Análise matemática – Conceções básicas

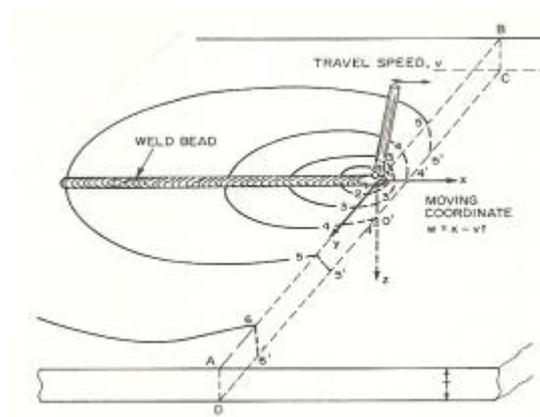


Figura 20 - Distribuição de temperaturas numa chapa a ser soldada, [13]

A Figura 20 representa esquematicamente o perfil de distribuição de temperaturas a quando da soldadura por arco-eléctrico de uma placa. A secção transversal da placa ABCD contém também as linhas isotérmicas que caracterizam essa distribuição de temperaturas.

Da transferência de calor obtemos a equação fundamental para tratar estes fenómenos, [13].

$$\rho C * \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}_G + k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial k}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

onde ρ é a densidade em g.cm^3 , C é o calor específico, cal.g^{-1} e k a condutividade térmica $\text{cal.cm}^{-1}.\text{sec}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, \dot{Q}_G a taxa de variação de temperatura devido ao calor gerado por unidade de volume $\text{°C.sec}^{-1}.\text{cal.cm}^{-3}$.

A análise matemática da fonte de calor parte de uma solução da equação 6, para determinada condição inicial e condições de fronteira definidas, [13]. De forma a utilizar a equação diferencial no domínio linear, as propriedades térmicas são consideradas constantes, ou seja, não variam com as temperaturas, [13]. Daí considerar-se $\partial k / \partial \theta = 0$ na equação 6. Outra simplificação passível de ser efectuada caso não haja geração ou dissipação de calor será igualar \dot{Q}_G a 0.

As características da fonte de calor durante a soldadura são afectadas pelos seguintes factores, de acordo com [13]:

- A fonte de calor move-se a velocidade constante sobre a superfície da peça ou próxima desta.
- O tamanho do arco eléctrico estabelecido é pequeno quando comparado com o tamanho da peça.

A fonte de calor envolve três diferentes estágios durante a soldadura, [13]:

- *Estágio 1: Saturação de calor. Temperatura na região envolvente à fonte de calor aumenta.*
- *Estágio 2: Regime quase-estacionário. Distribuição de temperaturas estacionária no sistema de coordenadas que acompanha a fonte de calor.*
- *Estágio 3: Estabilidade de temperaturas até à extinção do arco eléctrico. Arrefecimento.*

O estudo matemático do regime quase estacionário é simples, podendo o problema ser tratado considerando regime permanente, [13]. Este regime ocorre numa pequena área próxima da soldadura.

Para áreas distantes desta onde o regime estacionário não poderá ser equacionado, a análise matemática envolverá uma complexidade muito maior. Soldaduras que sejam efectuadas num curto intervalo de tempo, ou pequenos cordões de soldadura, também não poderão ser considerados como estando em regime-estacionário, já que o ciclo térmico será muito curto. Os ciclos térmicos estão também relacionados com o processo de soldadura como se constata na Figura 21 e Figura 24, [13].

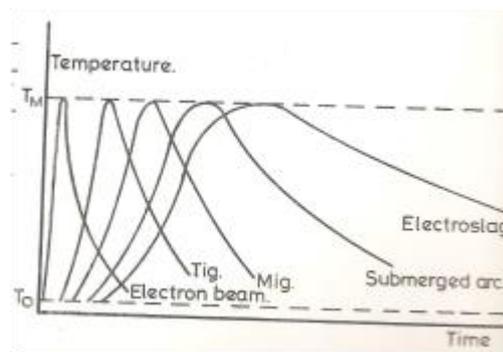


Figura 21 - Ciclos térmicos dos processos de soldadura, [20]

2.4.6 Efeito da forma da fonte de calor

A distribuição de calor afecta a distribuição de temperaturas substancialmente em zonas próximas onde a fonte de calor atua. As temperaturas em áreas afastadas da placa soldada por arco-eléctrico, Figura 22, podem ser obtidas com rigor por esquematização do padrão de distribuição de calor, assumindo que a fonte de calor atua no ponto O (ver Figura 20 e Figura 23). Assumindo que a fonte de calor está concentrada ao longo da linha O-O' (Figura 20), o problema da distribuição de temperaturas poderá ser analisado em 2D, [13].

Analisando então a secção transversal da placa, Figura 20, a diferença de temperaturas entre o topo e a parte inferior da chapa, esta é menor quanto mais próximo se estiver do ponto correspondente à fonte de calor.

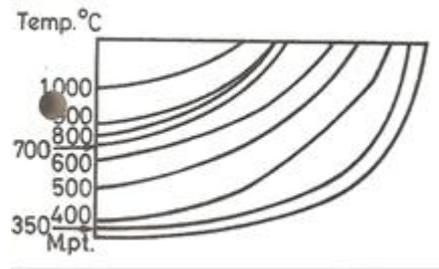


Figura 22 - Exemplo de perfil de temperaturas na secção transversal da chapa, [20]

Portanto é conclusivo que a forma da fonte de calor afectará a distribuição de calor e consigo a zona termicamente afectada, estrutura metalúrgica da região e dimensões do cordão de soldadura, para a mesma energia calorífica aplicada.

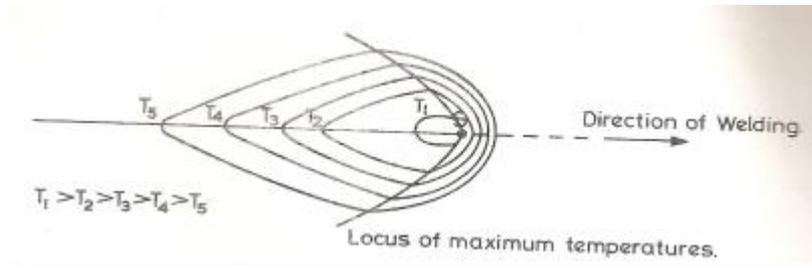


Figura 23 - Exemplo de perfil de temperaturas na superfície da chapa, [20]

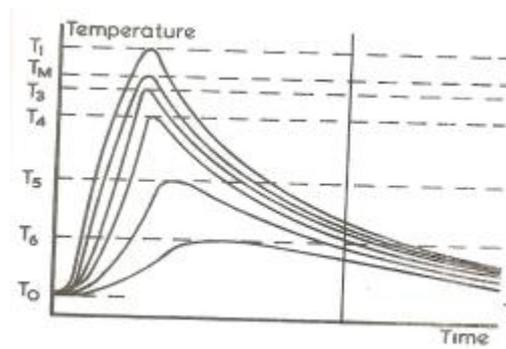


Figura 24 - Ciclos térmicos das temperaturas à superfície da chapa, [20]

Para um caso de uma soldadura de arco-eléctrico topo a topo de duas chapas rectangulares de dimensões 500x145x8 (mm) aço SM41, Figura 25, Feng [21] propõe a seguinte distribuição de temperaturas, Figura 26 e Figura 27:

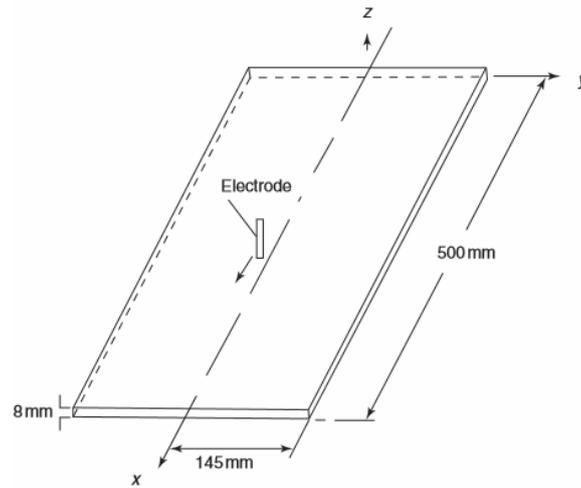


Figura 25 - Soldadura topo a topo, [21]

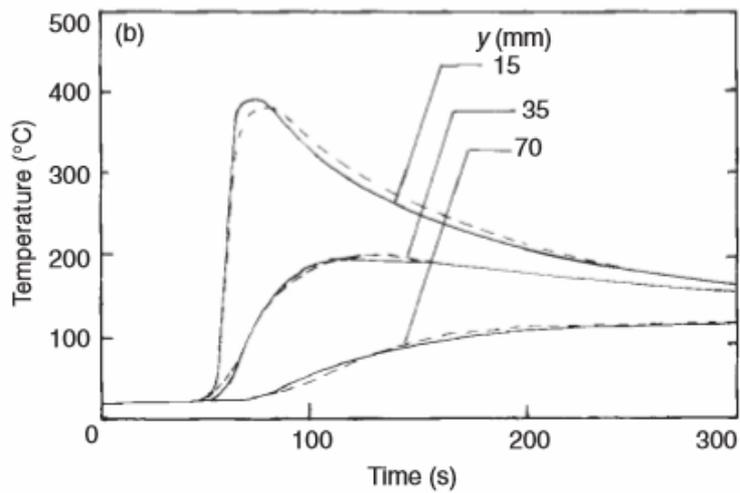


Figura 26 - Distribuição temporal de temperaturas ao longo de Y, [21]

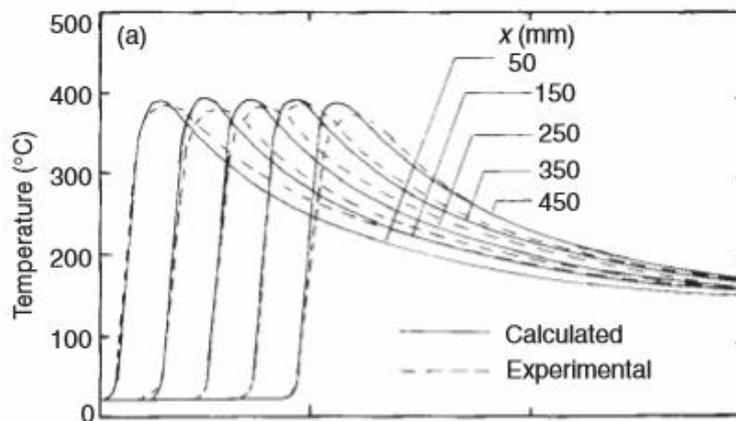


Figura 27 - Distribuição de temporal de temperaturas ao longo de X, [21]

2.4.7 Constantes físicas

Para efeitos de análise matemática as propriedades térmicas são assumidas como constantes, não o sendo na realidade. Apesar desta suposição ser útil em termos de processamento de resultados, pois facilita a sua resolução ao tornar as equações matemáticas envolvidas no domínio linear, conduzirá a erros pois não corresponderá exactamente ao que se passa na realidade, [13].

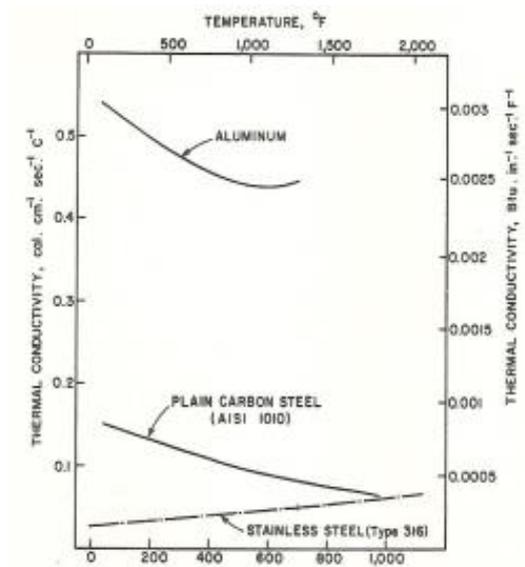


Figura 28 - Difusibilidade térmica do aço ao carbono e alumínio, [13]

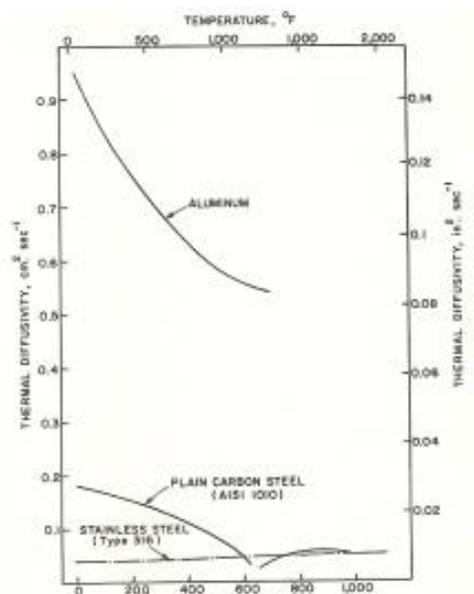


Figura 29 - Condutividade térmica do aço ao carbono e alumínio, [13]

A utilização de modelos matemáticos lineares para análise de efeitos de transferência de calor em soldadura continuam a ser válidos hoje em dia em utilizações computacionais, [13].

2.4.8 Desenvolvimento de modelos matemáticos

Os primeiros trabalhos na área foram desenvolvidos por Rosenthal (Bélgica) e Rykalin (URSS) em meados da década de 30 e inícios da década de 40 do século passado, [13]. Segundo [13], *estes estudos assentavam essencialmente na condução de fontes de calor em sólidos, usando uma fonte de calor móvel*. Actualmente muitas das soluções obtidas nestes modelos primários são usadas. Até à década de 60 foram feitas soluções baseadas no modelo de Rosenthal-Rykalin, contendo simplificações como, [13]:

1. *Análise limitada ao regime quase-estacionário.*
2. *Fonte de calor considerada num ponto (problemas 3D) ou numa linha (problemas 2D).*

Durante este período investigadores como Tanaka, Naka e Masubuchi estudaram fontes de calor em regime não estacionário, [13]. No final da década de 40 e durante a década de 50, Nippes e Savage efectuaram estudos relativos a taxas de arrefecimento e o seu efeito na zona termicamente afectada, baseando-se em resultados experimentais obtidos por equações de Rosenthal. Nos finais da década de 50, foram desenvolvidos métodos analíticos-empíricos sobre alterações metalúrgicas na zona termicamente afectada. Mais recentemente grandes centros de investigação como o MIT, com recurso a processamento computacional e à implementação de métodos dos elementos finitos, elevaram o nível de conhecimento na área em grande escala, [13].

2.4.9 Zona termicamente afectada – considerações na modelação matemática

A zona termicamente afectada é de difícil análise ao se encontrar exposta a ciclos térmicos complexos, gerando uma igualmente complexa estrutura metalúrgica, [13]. Os modelos matemáticos com base em equações lineares não são suficientes para validarem resultados experimentais, [13]. De acordo com [13], consideram-se alguns pressupostos na abordagem de problemas na zona termicamente afectada:

- *A zona termicamente afectada é demasiado próxima da zona de fusão não se podendo assumir que a fonte térmica seja um ponto localizado na superfície da placa.*
- *As temperaturas elevadas encontradas na zona termicamente afectada geram alterações significativas da metalurgia e das propriedades térmicas, não podendo estas alterações serem desprezadas.*

2.4.10 Factores que influenciam a zona termicamente afectada

A microestrutura e a dureza da zona termicamente afectada dependem da taxa de arrefecimento a que esta região estará sujeita. Este arrefecimento é afectado por vários factores, [13]:

- Espessura do material,
- Condições de soldadura,
- Pré-aquecimentos,
- Comprimento da soldadura,
- Geometria da junta.

Do arrefecimento dependem a dureza e a ductilidade da região, [13].

O controlo do calor aplicado durante a soldadura é também muito importante de forma a gerar zonas termicamente afectadas com boas características mecânicas. Um aquecimento excessivo levará a uma propagação das alterações microestruturais para além do recomendado, [13] fragilizando o componente.

2.5 Metalurgia de soldadura

É uma das áreas de soldadura mais importantes, visto determinar as propriedades químicas e mecânicas da ligação e do material da sua vizinhança.

Durante a soldadura ocorrem alterações de fase dos materiais. Uma soldadura de fusão envolve os estados sólido, líquido e gasoso, ocorrendo a transição entre estes três estados num curto intervalo de tempo, [22].

As alterações de fase metalúrgica não são exclusivas das variações de fase da matéria, podendo ocorrer em estado sólido, devido aos ciclos térmicos existentes. Durante o estado sólido a estrutura do aço pode apresentar-se como BCC ou FCC, Figura 31, [22].

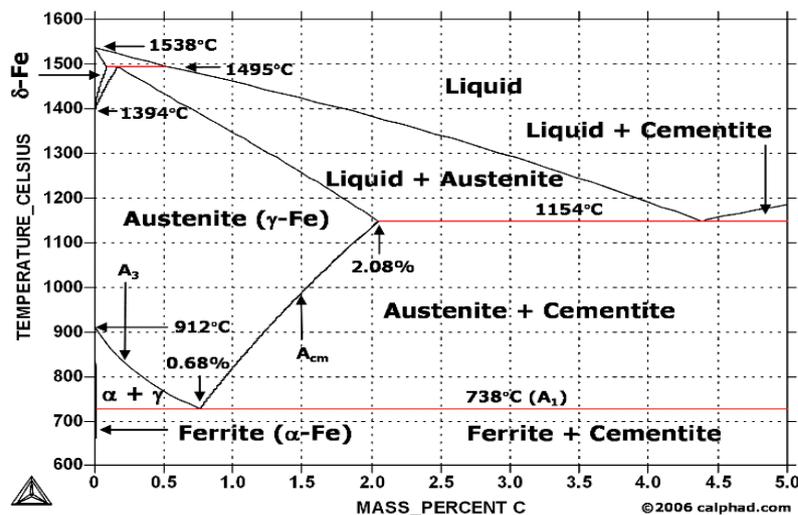


Figura 30 - Diagrama de fase Fe-C, [22]

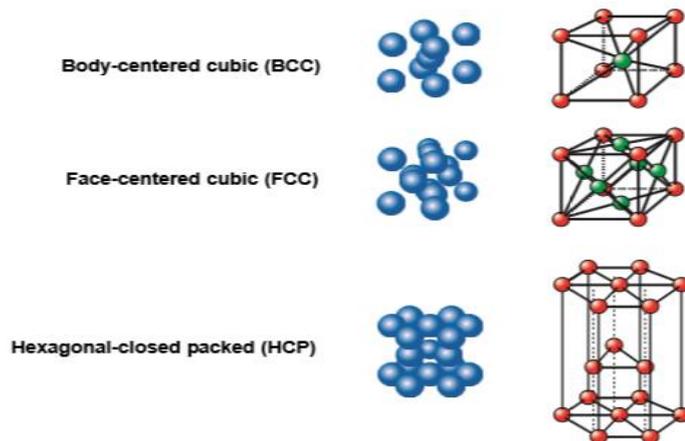


Figura 31 - Estrutura cristalina dos metais, [22]

Para compreender os fenómenos metalúrgicos para tratamentos térmicos num aço, recorre-se a diagramas de fase (diagramas de equilíbrio), Figura 30, que indicam a percentagem de carbono função da temperatura. Contudo tudo isto é apenas válido para tratamentos térmicos lentos, [22].

No caso da soldadura, que envolve mudanças bruscas de fase em curtos intervalos de tempo, os diagramas de fase não são aplicáveis. Segundo [22], *considerando um arrefecimento rápido a partir dos 912°C, estrutura FCC (austenite), os átomos de carbono não dispõem de tempo para se difundirem e formarem cementite*. Durante este arrefecimento o aço tende a formar uma estrutura de corpo centrado BCC, não o conseguindo obter neste curto intervalo de tempo, ficando os átomos de carbono presos, dando origem a uma estrutura BCC distorcida chamada de martensite, [22].

À medida que o teor de carbono aumenta, a distorção da estrutura BCC será maior, reflectindo-se também num aumento da dureza, bem como da fragilidade do aço, [22].

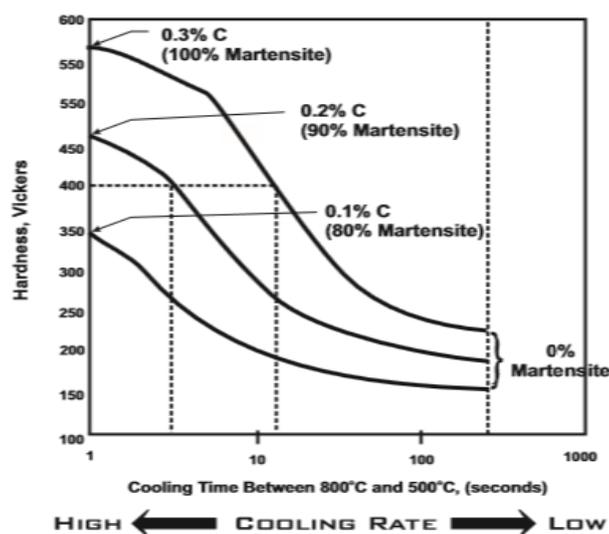


Figura 32 - Percentagem de martensite relativamente à percentagem de carbono, [22]

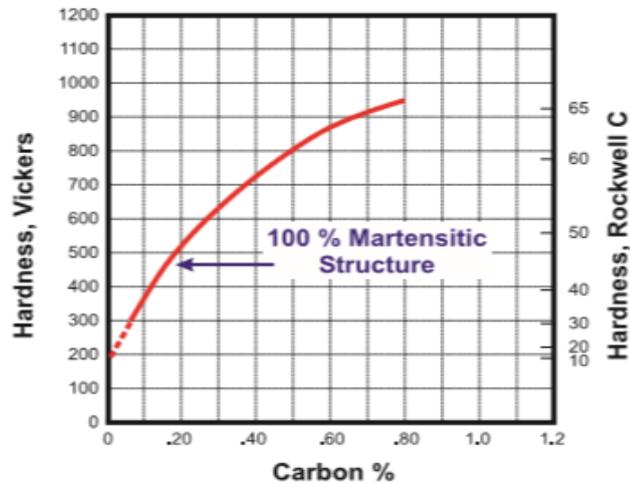


Figura 33 - Dureza de Vickers em função do arrefecimento, [22]

A Figura 32 ilustra a percentagem de martensite formada, função da dureza de Vickers e do tempo de arrefecimento. Estão representados três aços, Figura 33, com a mesma composição de Mn (1,2%) e Si (0,2%), variando o teor de C entre 0,1-0,3%.

A zona do cordão de soldadura é a que estará sujeita de maior forma a estas variações térmicas, ficando o cordão mais duro com o aumento da percentagem de martensite na sua composição, [22].

A martensite é também formada na zona termicamente afectada.

A quantidade de elementos de liga na composição do material conduz a um favorecimento do aumento da formação da martensite, [22].

A percentagem de carbono bem como dos elementos de liga contribui também para a soldabilidade do aço, sendo esta menor com o aumento dessas percentagens, [22].

2.5.1 Influência da dureza na soldadura

De acordo com [22], a dureza é a medida de resistência do material à deformação plástica.

Durante a soldadura, na sua fase de aquecimento o metal dilata, sendo este muito menos resistente do que o material de base circundante. No arrefecimento, o volume diminui, o que leva a que os átomos se orientem nas direcções que possuem liberdade para tal. Ao serem causadas restrições ao nível desta liberdade de movimento, a probabilidade do aparecimento de fracturas aumentará, bem como a dureza do material, [22].

É portanto fundamental controlar a dureza do material no cordão de soldadura.

2.5.2 Zona termicamente afectada (ZTA)

A soldadura não consiste apenas na zona do cordão. Na sua fronteira há uma porção de material que viu as suas características mecânicas e metalúrgicas alteradas, ainda que não tenha atingido a fusão aquando da etapa de aquecimento.

As três zonas consideradas decorrentes da soldadura estão representadas na Figura 34, de acordo com [22]:

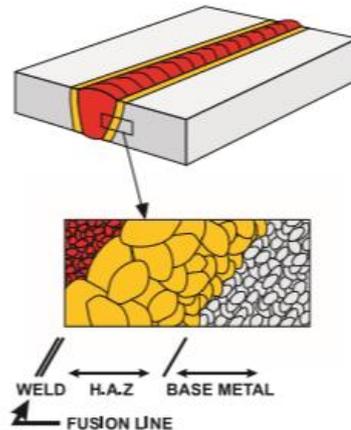


Figura 34 - Zonas afectadas resultantes da soldadura, [22]

- Cordão de soldadura: zona onde o material se encontra misturado devido à fusão ocorrida.
- Linha de fusão: *Linha que separa o cordão de soldadura da zona termicamente afectada. Encontra-se imediatamente abaixo da temperatura de fusão.*
- Zona termicamente afectada: zona onde não ocorreu fusão mas que se encontra alterada devido a alterações térmicas.

A zona termicamente afectada depende do calor do processo de soldadura e da condutividade térmica do material soldado bem como do procedimento de soldadura e das características do material de base. Quanto maior for a calor depositado no processo, maior será a zona termicamente afectada. O aumento da condutividade térmica do material gerará uma maior dissipação de energia, o que favorecerá a diminuição dessa zona, [22].

Trata-se de uma zona de extrema importância dado que as fracturas ocorrem maioritariamente nesta região, Figura 35, sendo uma zona sujeita a alterações de fase no metal dada a proximidade com o cordão de soldadura, o tamanho dos grãos será maior devido à menor temperatura atingida, ficando esta zona com menor resistência, [22].

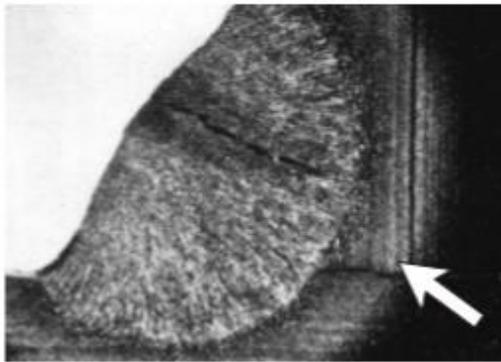


Figura 35 – Fissuras em zona termicamente afectada numa soldadura de canto, [22]

2.5.3 Soldabilidade dos materiais

Designa-se soldabilidade a capacidade do material oferecer facilidade de realizar soldaduras isentas de defeitos, não comprometendo a funcionalidade da união.

A soldabilidade não é exclusiva dos materiais a soldar, sendo também dependente do material do eléctrodo, gás de protecção, parâmetros de soldadura e taxa de arrefecimento, [22].

2.5.4 Solidificação do cordão de soldadura, origem de fissuras.

Pode-se comparar este fenómeno ao da solidificação aquando do processo de fundição, [22].

São formados cristais (dentrites) junto ao material que permaneceu em estado sólido, Figura 36. Entre estes cristais ficam alojados elementos como carbono, enxofre e fósforo, solidificando depois do restante cordão. É então nessas regiões que se estabelecem as zonas fracas do cordão, [22].

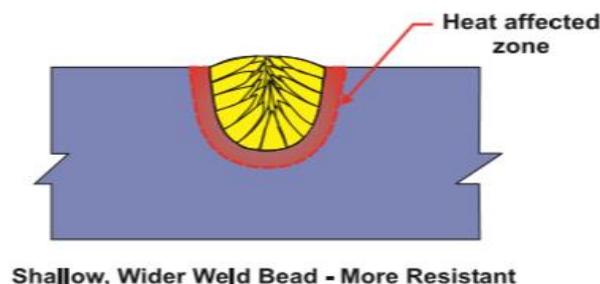


Figura 36 - Solidificação do cordão de soldadura, [22]

Um correto ajuste dos parâmetros de soldadura e do seu modo operatório evitará a diluição destes elementos indesejados no banho de soldadura.

2.5.5 Fissuração devida ao hidrogénio

A mistura de hidrogénio no banho de fusão é muito comum. Advém do ambiente que rodeia a soldadura, da humidade, está presente em eléctrodos e em gases de protecção, [22].

Quando presente na soldadura, este afecta as suas propriedades mecânicas e propicia o aparecimento de fendas, reduzindo capacidade de deformação plástica da união, Figura 37.

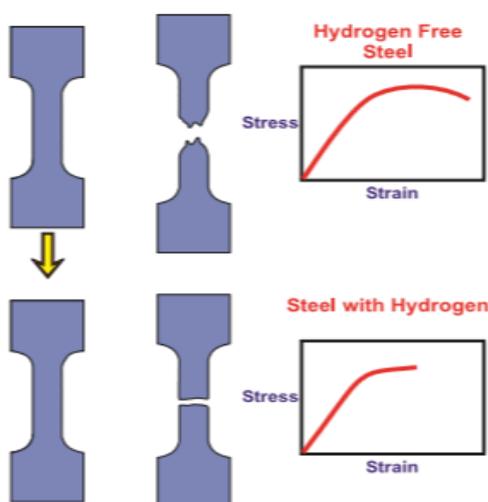


Figura 37 - Ensaio de tracção em provetes contendo presença ou não de hidrogénio, [22]

Existem várias formas para contornar este problema, tais como a utilização de processo com baixo teor em hidrogénio e utilizar um pré-aquecimento, reduzindo desta forma a variação térmica durante o arrefecimento, [22].

2.5.6 Tratamentos térmicos

Utilizados para alterar as características mecânicas dos materiais. Estes tratamentos são muito utilizados na soldadura de forma a controlar as propriedades mecânicas dos materiais.

Podem ser aplicados antes e depois da soldadura.

Os tratamentos térmicos mais utilizados são os seguintes:

Tabela 18 - Características dos tratamentos térmicos, [22]

Tratamento térmico	Características
Recozimento	<ul style="list-style-type: none"> - Aquecimento a elevadas temperaturas seguido de arrefecimento lento. - Transformação total para estrutura austenítica.
Normalização	<ul style="list-style-type: none"> - Similar ao recozimento mas com arrefecimento mais acelerado. - Controlo do tamanho de grão e alívio de tensões.
Têmpera	<ul style="list-style-type: none"> - Aquecimento a altas temperaturas e arrefecimento brusco. - Confere elevada rigidez e baixa tenacidade. - Um reaquecimento posterior otimiza as características mecânicas
Alívio de tensões	<ul style="list-style-type: none"> - Material aquecido de forma uniforme e arrefecido lentamente de forma a aliviar tensões residuais.

2.6 Tensões residuais e distorções

As tensões residuais e as distorções além de indissociáveis, não podem ser totalmente eliminadas, daí a sua determinação e controlo serem objecto de inúmeros estudos. Devido ao elevado número de variáveis envolvidas nestes fenómenos físicos, a experiência e a teoria são as melhores ferramentas ao dispor de quem lida com esta temática.

Nos processos de soldadura são produzidos ciclos térmicos de elevada magnitude, o que geram alterações de fase e contracções/dilatações do material envolvido. A essas variações dimensionais estão incluídas deformações plásticas, que serão a origem das distorções e das tensões residuais.

Em condições de serviço, as distorções de tensões residuais nas estruturas soldadas, são função de parâmetros de fabrico, de material e estruturais. Dos parâmetros de fabrico incluem-se os parâmetros do processo de soldadura e pormenores relativos à montagem das peças. Os parâmetros de material remetem às características químicas e mecânicas dos materiais de base e de adição, bem como ao estado das superfícies. Os parâmetros estruturais dizem respeito à geometria, tipo de junta e espessura do material.

2.6.1 Tensões residuais

Segundo Masubuchi, [23], entende-se como tensões residuais, *as tensões presentes num corpo na ausência de carregamentos externos*. Estas tensões podem tomar diferentes denominações, dependendo da origem a que está associada, podendo ocorrer à escala microscópica ou macroscópica, [23]. As tensões residuais estão relacionadas com os vários processos de fabrico até à obtenção final da peça, [23].

No caso concreto da soldadura, as tensões residuais tem origem em grande parte no gradiente de temperatura não uniforme na peça. Ao serem geradas diferentes

expansões/contrações de volume nas várias peças originam-se distorções e consequentemente tensões residuais.

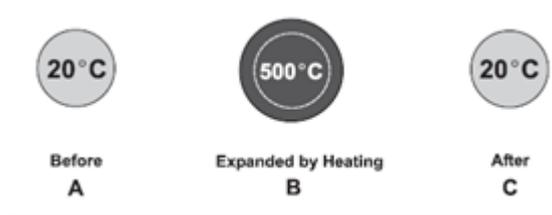


Figura 38 - Expansão e contração livre de uma esfera de metal, [24]

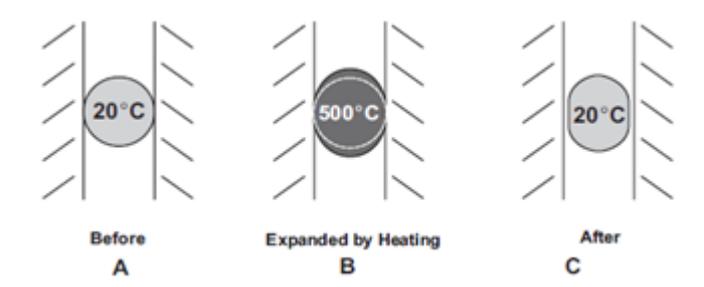


Figura 39 - Expansão e contração restringida de uma esfera de metal, [24]

As Figura 38 e Figura 39 ilustram o fenómeno das variações dimensionais ocorridas na soldadura, por analogia com uma esfera de metal com o seu movimento livre e restringido. Quando a sua dilatação é livre, os grãos tem liberdade total para se ajustarem sob influência da força de expansão, acontecendo o mesmo na contração. Caso hajam restrições ao movimento expansivo, o material tende a escoar para os locais que oferecem menor resistência. Após o arrefecimento obtém-se uma esfera deformada e com tensões residuais induzidas, [24].

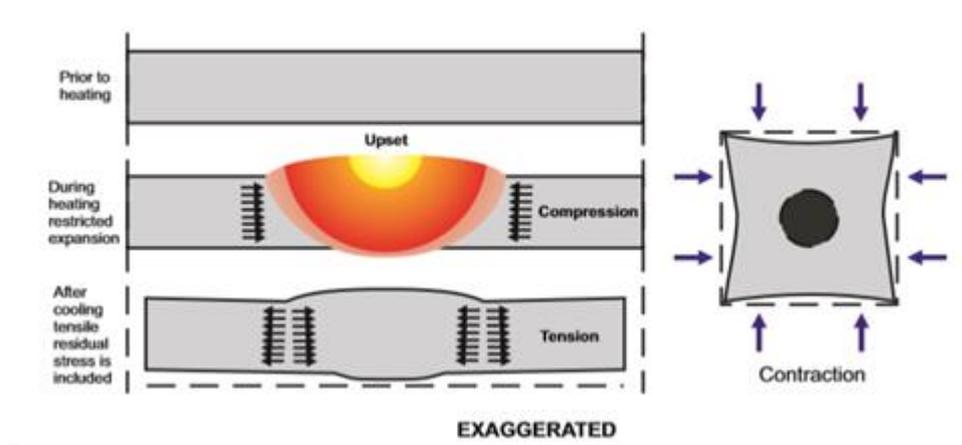


Figura 40 - Expansão e contração de um cordão de soldadura, [24]

Nesta Figura 40 é possível ter a noção da passagem da analogia com a esfera de metal, para um caso concreto de soldadura. Durante o aquecimento há uma restrição ao movimento do banho de fusão. Na fase do arrefecimento são geradas distorções e tensões residuais na união devidas às restrições de movimento.

2.6.2 Tensões residuais soldadura topo a topo

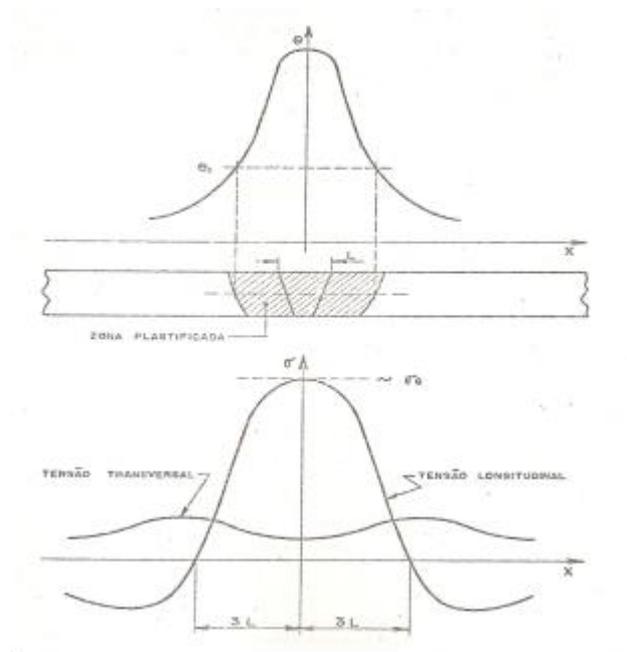


Figura 42 - Regiões plastificadas de acordo com tensões residuais, [25]

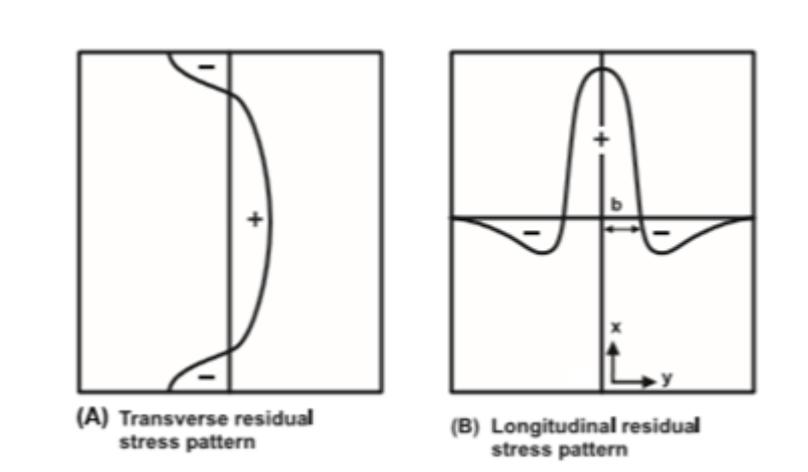


Figura 41 - Tensões residuais ao longo do cordão e soldadura a) e ao longo da largura da peça b), [24]

Segundo [24] e [25], num caso em que duas placas de igual espessura e com as suas dimensões de valor infinito em x e y , Figura 41 e Figura 43, observam-se as maiores tensões na direcção longitudinal ao cordão de soldadura, sendo as na direcção transversal de menor valor. Essas tensões ao serem de tracção são preocupantes visto que comprometem o

comportamento do componente na presença de fissuras (tensões de compressão não favorecem a propagação de fendas).

O valor das tensões residuais instaladas no cordão de soldadura pode ser próximo dos valores da tensão de cedência, [24], ficando a união com uma margem reduzida para o suporte de esforços. As tensões são máximas ao longo do cordão de soldadura, seguindo o mesmo raciocínio visto anteriormente tanto para a esfera (Figura 38 e Figura 39) como para o caso da aplicação em soldadura (Figura 40). O valor das tensões decresce à medida que o material terá sido menos afectado termicamente.

Da Figura 42, notar que abaixo da temperatura θ_1 , não se geram tensões residuais, daí não resultar deformação plástica.

2.6.3 Tensões residuais resultantes de soldadura de corte

Ao proceder-se ao corte de uma chapa com recurso a oxicorte, Figura 43, os bordos da mesma estarão sujeitos a grandes variações térmicas e encolherão durante o arrefecimento, dando origem a tensões de compressão, [24].

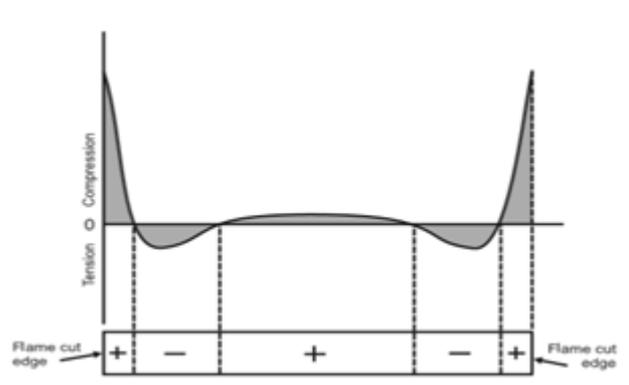


Figura 43 - Tensões residuais resultantes do processo de corte por chama, [24]

2.6.4 Distorções

As distorções ocorrem na soldadura devido às tensões residuais envolvidas antes, durante e depois da mesma. O material procura obter um estado de equilíbrio e devido à plastificação inerente ao processo de soldadura por fusão, este altera as suas dimensões de variadas formas, [24].

Tipos de distorções

Encolhimentos:

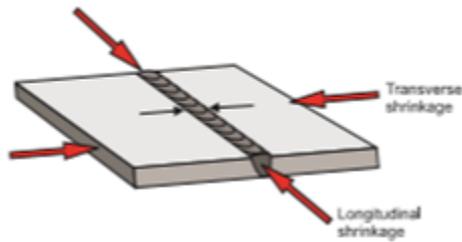


Figura 44 - Encolhimento longitudinal e transversal, [24]

Causa: contracções do cordão de soldadura.

Distorção angular:

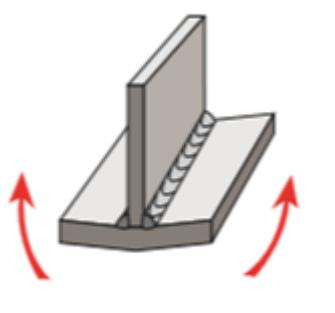


Figura 45 - Distorção angular, [24]

Causa: distribuição térmica não uniforme ao longo da direcção da espessura, geram tensões residuais não simétricas ao longo do eixo neutro da peça.

Distorção rotacional:

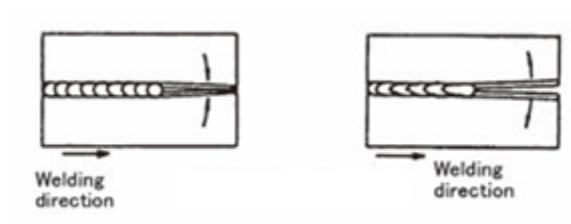


Figura 46 - Distorção rotacional, [26]

Causa: expansão térmica não uniforme.

Flexão:

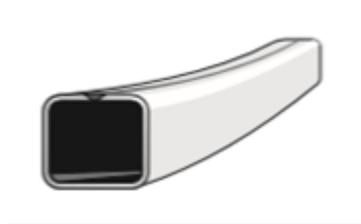


Figura 47 – Flexão, [24]

Causa: encolhimento longitudinal. Tensões residuais não simétricas ao longo do eixo neutro, devido a diferentes gradientes térmicos.

Encurvadura:



Figura 48 – Encurvadura, [24]

Causa: tensões de compressão em placas finas.

Torção:

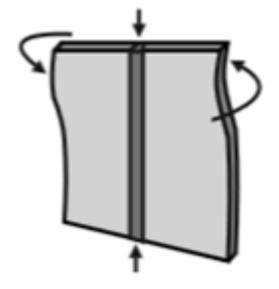


Figura 49 – Torção, [24]

Causa: elevado encolhimento longitudinal em placas finas.

2.6.5 Processos de soldadura e distorção

Os processos de soldadura são importantes no controlo da distorção, visto que controlam a entrega energética que irá originar as variações de temperatura a que a peça estará sujeita.

Número de passes: genericamente a distorção aumenta com o aumento do número de passes realizados, [24]. Para a mesma espessura de material, vários passes de pequeno diâmetro geram maior distorção do que poucos passes largos, [24]. Muitos passes favorecem ainda o aumento dos encolhimentos transversais, graças ao “amontoar” de área soldada ao longo da chapa. Nos casos em que a distorção longitudinal é crítica, aumentar o número de passes na soldadura é benéfico, já que para pequenos cordões de soldadura as forças de contracção serão menores e a placa estará mais sujeita a este tipo de distorção, [24].

Velocidade de soldadura do arco: a fonte de calor proveniente da soldadura de arco eléctrico apresenta planificadamente a forma de um elipsóide, Figura 50. Quanto menor for a velocidade de temperatura maior será o tempo de contacto da fonte com a peça, o que irá gerar maior temperatura causando maiores distorções na peça, [24]. Todavia uma velocidade excessiva conduzirá a falhas de penetração na soldadura, [24].

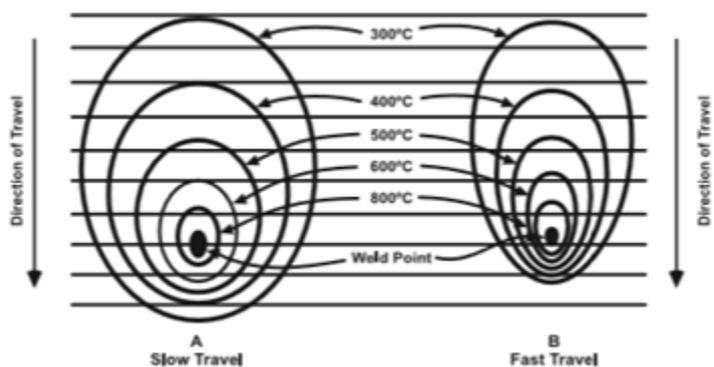


Figura 50 - Influência da velocidade de soldadura no campo térmico, [24]

Uniformidade da fonte de calor: as distorções e tensões residuais seriam reduzidas se a distribuição de temperaturas ao longo da soldadura fosse uniforme, o que nem sempre é possível. No ponto da soldadura o material é aquecido e expandido de uma certa forma, sendo no entanto as áreas adjacentes sujeitas a diferentes aquecimentos, gerando um desequilíbrio no campo de deslocamentos [24]. Um pré-aquecimento no final da soldadura terá um efeito de alívio de tensões residuais, seguindo a mesma concepção da uniformidade da fonte de calor, [24].

Desenho de junta, preparação e montagem: é importante de forma a tentar distribuir da melhor maneira a energia do processo de soldadura. Assegurar a menor deposição de material

de adição (menores encolhimentos), ter em conta a largura do *fillet* (menor distorção angular) e procurar a melhor geometria do entalhe, são procedimentos a ter em conta, [24].

Sequência de soldadura: de interesse para soldaduras de múltiplos passes. É possível reduzir as distorções globais na estrutura através da ordem de deposição dos cordões de soldadura como é visível na Figura 51. Os primeiros passes gerarão maiores distorções, sendo posteriormente corrigidas nos passes seguintes, [24].

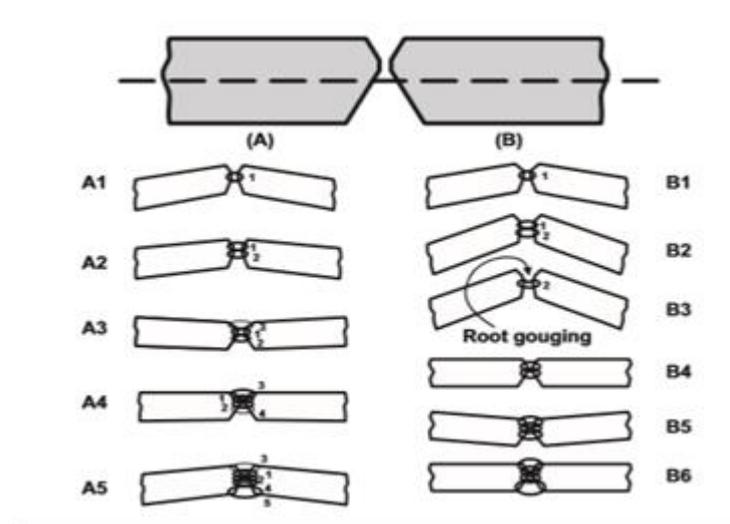


Figura 51 - Sequência de soldadura para minimizar distorções, [24]

2.6.6 Determinação de distorções de tensões residuais

As tensões residuais obedecem a condições de equilíbrio, [23] sendo que a sua força resultante e momento resultante anular-se-ão:

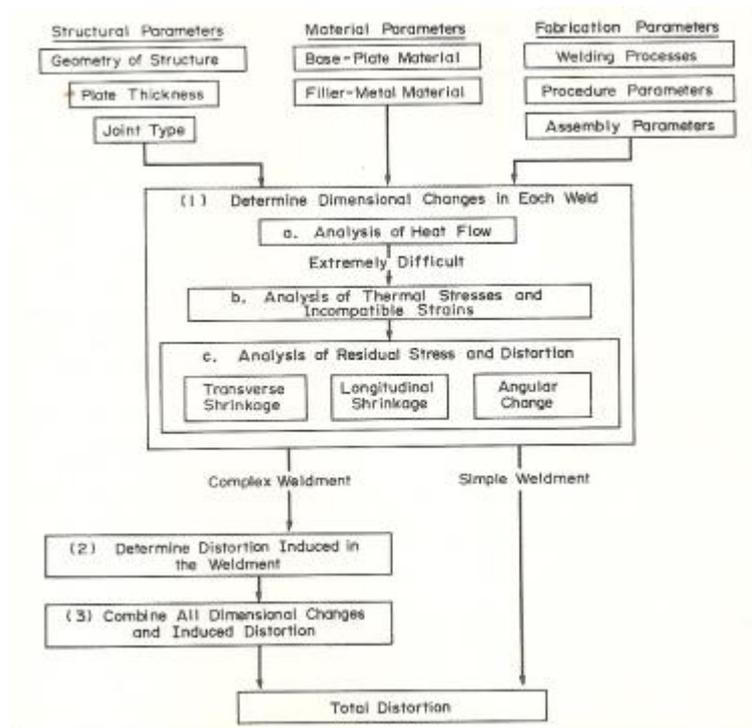


Figura 52 - Determinação de distorções e tensões residuais em soldadura, [23]

Como retratado na Figura 52, é possível determinar tensões residuais e distorções de forma analítica utilizando três métodos. De acordo com [23]:

- *Determinação das alterações dimensionais na estrutura devidas a cada soldadura.*
- *Determinação da distorção na estrutura devido às mesmas alterações dimensionais.*
- *Combinação de todas as alterações dimensionais e distorções induzidas.*

A determinação das alterações dimensionais pode ser dividida pelo seguinte, [23]:

- *Análise do fluxo de calor.*
- *Análise das tensões de origem térmica resultantes do processo de soldadura de modo a determinar as deformações plásticas que não satisfaçam as condições de compatibilidade da teoria da elasticidade.*
- *Determinação das alterações dimensionais causadas pelas deformações plásticas.*

A distribuição das deformações plásticas é difícil de quantificar, visto que no domínio da plasticidade, a relação tensão/deformação não é linear, [23]. Porventura se o problema a tratar contiver uma pequena região de deformação plástica, a ponto de poder ser desprezada, bastará uma análise puramente elástica para obter resultados por via analítica da distorção originada, [23].

2.6.7 **Controlo de distorções**

Na impossibilidade de serem totalmente removidas sem incrementarem as tensões residuais, os métodos mais comuns para redução de controlo de distorção são os seguintes, [26].

- Preparação cuidada da junta de forma a reduzir o montante de material de adição depositado;
- Soldar pelo eixo neutro da peça;
- Usar soldadura intermitente em vez de contínua;
- Usar sequência de soldadura de forma a cada união ter a máxima liberdade de movimento durante o máximo período de tempo;
- Dividir soldaduras complexas em várias soldaduras de forma a reduzir a distorção total;
- Utilizar pré-deformação plástica ou pré-deformação elástica;
- Pré-aquecimento para tornar mais uniforme o aquecimento e arrefecimento;
- Martelagem (*peening*), reduz o encolhimento pois esforça o material soldado;
- Restrições: condições de aperto, arrefecimentos entre passes;
- Arrefecimento artificial;
- Usar *software* e modelos matemáticos para previsão de distorções.

2.6.8 **Correcção de distorções**

Citando Masubuchi, [26], *a técnica mais comum de remoção de distorções é a aplicação de calor sobre pontos seleccionados ao longo da placa e depois proceder ao seu arrefecimento em água*. Muito utilizado também é a martelagem, [26]. Ambos se tratam de processos pouco precisos que dependem da habilidade do operador.

O alívio de tensões vibratório e a martelagem electromagnética são outros processos de correcção, ainda que pouco utilizados e complexos.

O primeiro destes processos consiste num aparelho vibratório com frequência variável que é acoplado à peça. Com recurso a um amplificador electrónico, é ajustada a frequência de forma a ser excitada a frequência de ressonância da peça. Esta é excitada por intervalos de tempo de 10 a 30 minutos, [26]. O segundo método utiliza força electromagnética para esforçar a peça. A condutividade do material da peça determina a eficiência da conversão de energia em força magnética. *Para materiais com baixa condutibilidade, muita da energia será gasta para aquecer a peça*, de acordo com [26].

2.6.9 Desenvolvimentos recentes

Nas últimas décadas o desenvolvimento computacional utilizando método dos elementos finitos, permitiu uma análise mais rigorosa da distribuição das tensões residuais em peças soldadas.

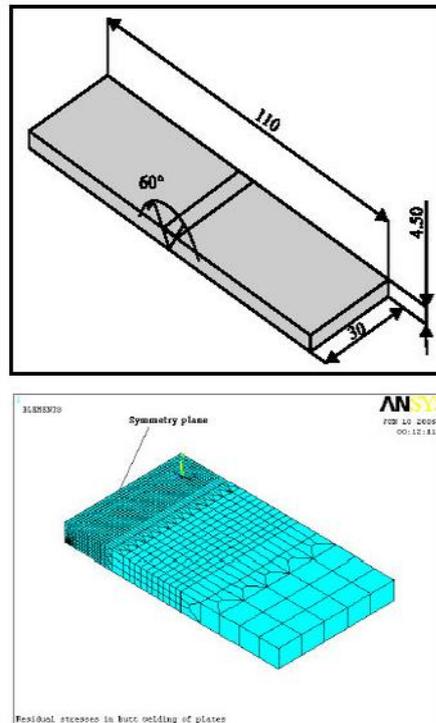


Figura 53 - Soldadura topo a topo arco eléctrico e modelação MEF, [27]

No caso de uma soldadura topo a topo de chapas de aço ASTM A36, realizada em arco-eléctrico, Nadimi [27] propõe o seguinte campo de tensões residuais.

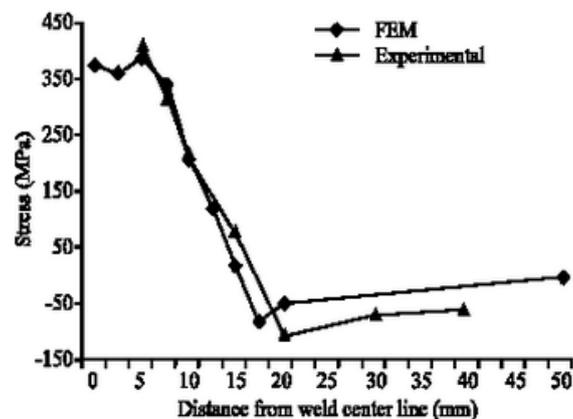


Figura 54 - Tensões residuais axiais, [27]

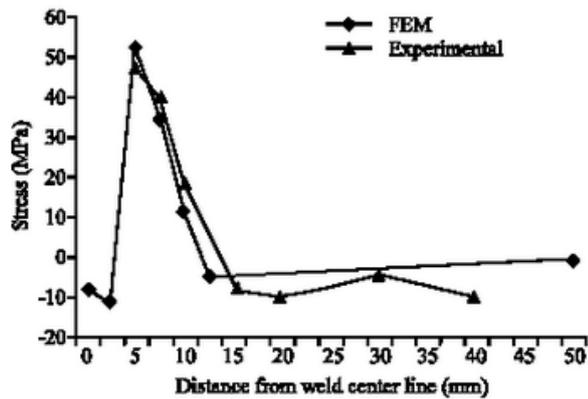


Figura 55 - Tensões residuais transversais, [27]

A análise via método dos elementos finitos é bem sucedida para as zonas de tensões residuais mais elevadas, havendo contudo alguma divergência para valores próximos das extremidades da placa. Isso é explicado devido ao baixo grau de refinamento da malha MEF existente nessa zona, Figura 53.

Soluções envolvendo simulações elasto-plásticas em chapas finas demonstram um campo de tensões residuais ligeiramente diferente do caso teórico já discutido da Figura 41. Dean Deng e Hidekazu Murakawa [29], através de análises realizadas com base em ABAQUS para placas finas e soldadura MIG/MAG, obtiveram entre outros resultados, um campo de tensões residuais que vem validar o ligeiro decréscimo do valor das tensões residuais no cordão de soldadura, sendo estas maiores na ZTA.

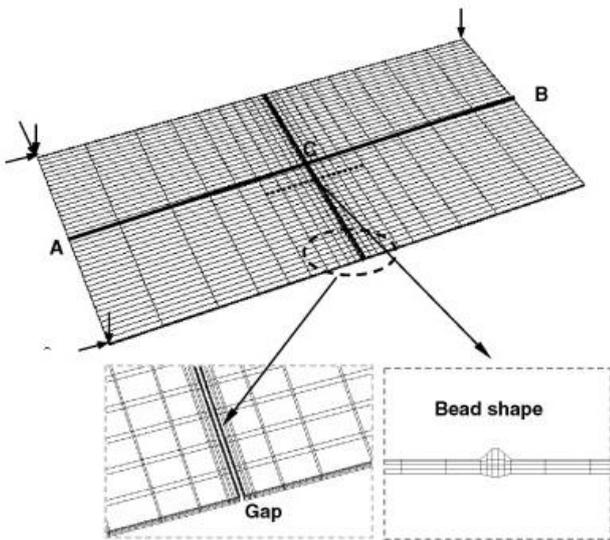


Figura 56 - Modelo elaborado em MEF, [29]



Figura 57 - Soldadura em chapas finas, [29]

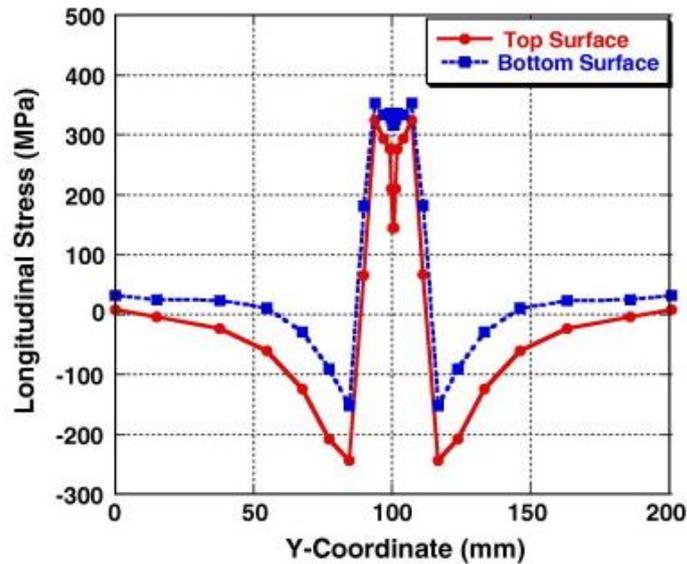


Figura 58 - Tensões residuais longitudinais para análise MEF de elevadas deformações, [29]

Recentemente foram desenvolvidas técnicas de medição de tensões residuais baseada na difracção de neutrões no projecto europeu *RESTAND*, [28].

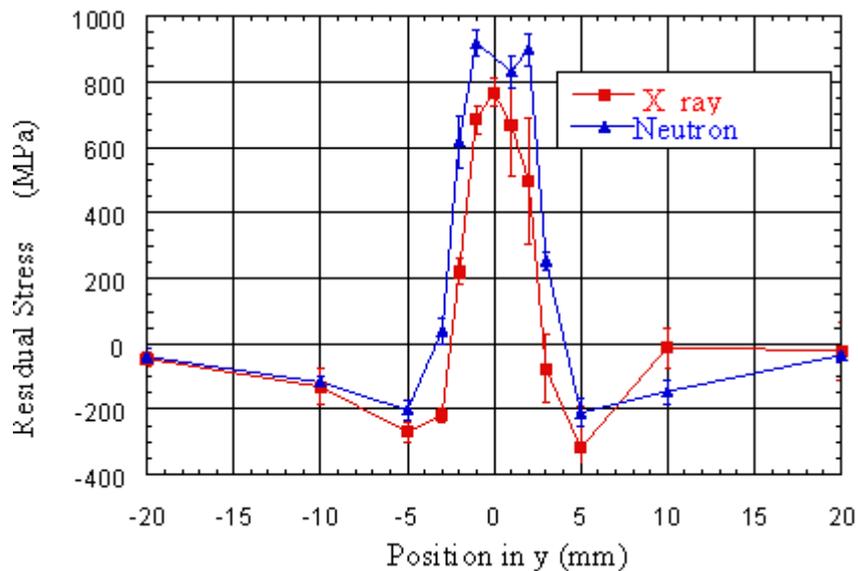


Figura 59 - Medição de tensões residuais em provetes de soldadura por fricção, utilizando método da difracção por raios X e por neutrões, [28]

Esta técnica pode ser utilizada para validação de modelos de MEF devido aos bons resultados obtidos, como mostra a Figura 59, obtida com provetes de soldadura por fricção.

Do caso tratado por Feng, [21], ilustrado na Figura 25, a distribuição de tensões residuais a meio da placa apresentada é a seguinte:

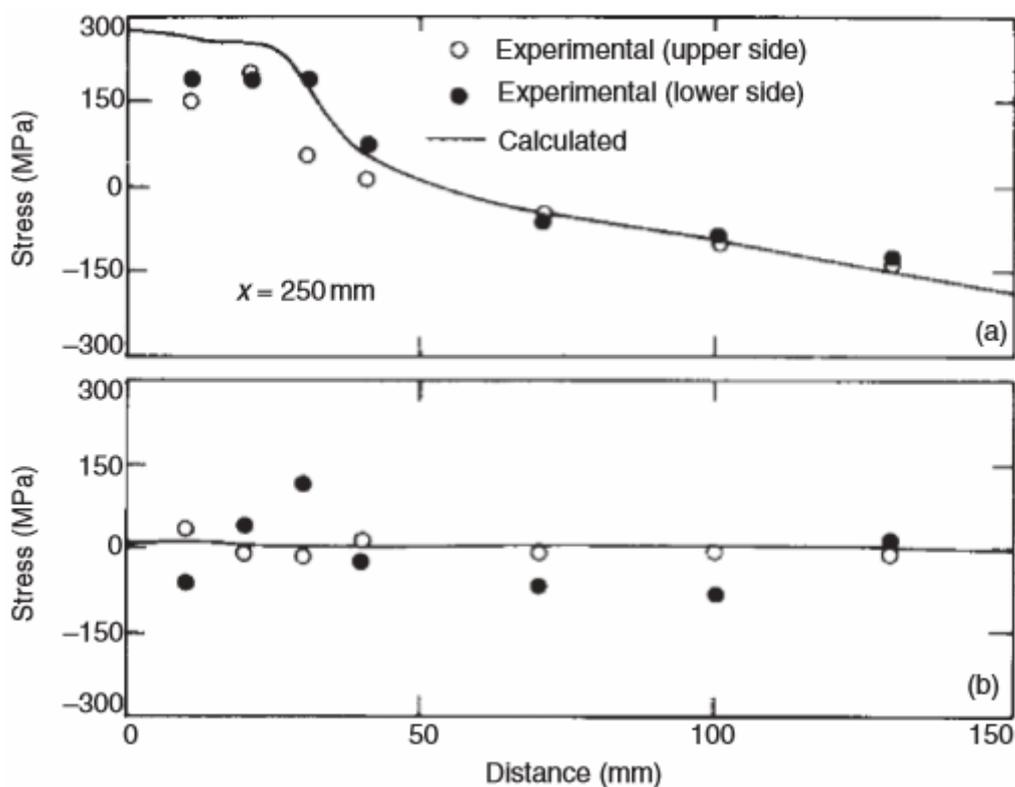


Figura 60 - Distribuição de tensões residuais, [21]

No primeiro gráfico da Figura 60 estão representadas as tensões residuais segundo a direcção do cordão de soldadura (σ_x) para um instante de tempo infinito. No segundo gráfico estão representadas as tensões ao longo da largura da placa (σ_y), [21].

3. Fundamentos de Sysweld

O *Sysweld* e o *Weld Planner* são *softwares* da *ESI Group* baseados em método dos elementos finitos para resolução de problemas referentes a distorções e tensões residuais em soldadura.

Cada um apresenta características adequadas ao tipo de complexidade do estudo em causa.

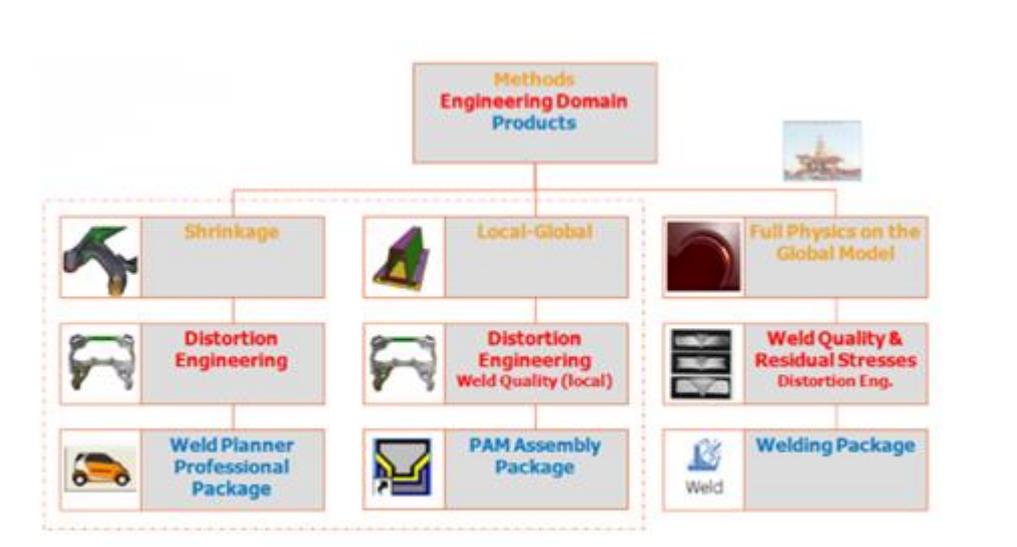


Figura 61 - Modelos de engenharia dos softwares de soldadura da ESI Group, [1]

3.1 Weld Planner

- Para soluções de engenharia que envolvam rápido tempo de processamento.
- Adequado para peças soldadas de grande dimensão em que a quantificação das tensões residuais não seja de interesse.
- Utiliza o método da contracção para determinação das distorções, [30].
- Optimiza sequências de soldadura de forma a minimizar as distorções resultantes das mesmas, [30].
- Permite a gestão de conjuntos com muitas soldaduras e componentes, [30].

- Utiliza essencialmente modelação 2D, contudo podem ser usados elementos sólidos, [30].

Tipo de análise, [30]:

- Análise não linear do material junto ao cordão de soldadura (plasticidade do material, mudanças de fase metalúrgica).
- Análise elástica do material fora da região de interesse da soldadura.
- Distorção global da estrutura calculada com base em contracções do material fundido.

Método da contracção:

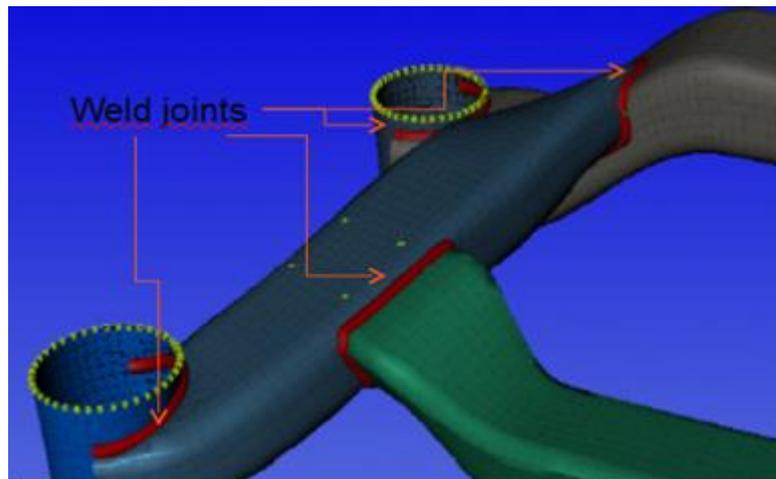


Figura 62 - Exemplo de cordões de soldadura com temperaturas impostas (método da contracção), [30]

As soldaduras definem-se como grupos de nós aos quais é imposta uma temperatura, Figura 62. É determinada a resposta da mesma perante essa solicitação, tendo em conta a expansão térmica do material. Assim se retiram os valores das tensões e das deformações, sendo que devido à imposição de temperatura nas soldaduras, os valores das tensões residuais nestas não serão realistas, [30].

Software:

- Pré-processador, processador e pós-processador básico incluídos.
- Utiliza *Visual Mesh* para geração da malha de método dos elementos finitos.
- Utiliza *Visual Viewer* para pós-processamento avançado.
- Na versão mais recente até ao momento disponível (*Weld Planner 2012.5*), o *software* de processamento aplicável é o *Pam Crash*.

3.1.1 Tipos de formatos

De acordo com [30]:

- Ficheiros de malha: *ASC* - contém a descrição da malha de método dos elementos finitos e dos grupos.
- Ficheiros de projecto: *WPP* - contém a descrição do projecto e os conjuntos de elementos e nós (componentes, linhas de soldadura, fixadores).
- Ficheiros de processamento: *.DAT* - contém os comandos para processamento.
- Ficheiros de processamento log: *.LOG* - contém a saída do processamento bem como mensagens de erro do mesmo.
- Ficheiros de resultados: *_result.DAT* - deslocamentos da última iteração do cálculo.
- Ficheiros de resultados: *.fdb/ .dsy* - tensões residuais e deslocamentos para todos os instantes de tempo do processamento.

3.1.2 Calibração do Weld Planner

Os modelos implementados carecem de ajustes de forma a se poderem obter resultados mais próximos aos reais. No caso do *Weld Planner* que é um *software* de rápido processamento, a qualidade dos resultados depende em muito da calibração do programa. Esta calibração consiste em obter um ajuste na zona de plastificação função do encolhimento da peça.

Existem duas formas de efectuar a calibração, [30]:

- Através de métodos experimentais.

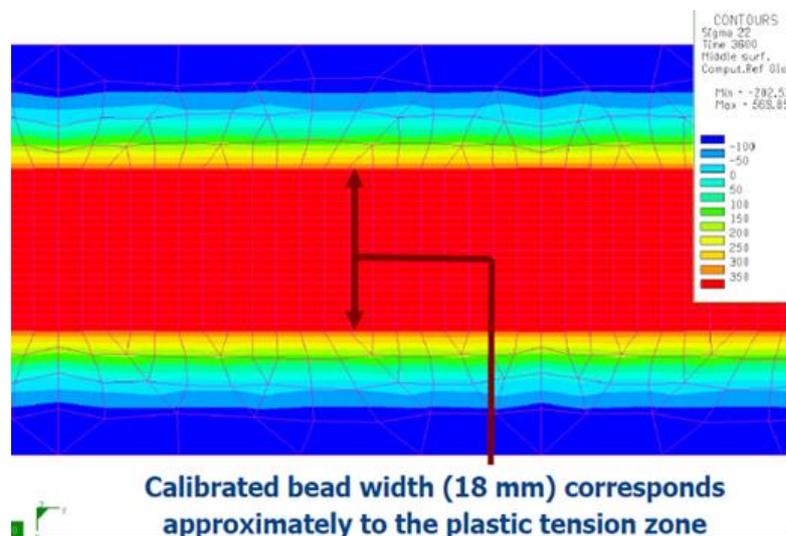


Figura 63 - Calibração através da zona plasticamente deformada, [30]

- Através do cálculo da zona de tensão de cedência de uma soldadura, acertando posteriormente as dimensões do cordão de soldadura, Figura 63.

Deve-se garantir a existência de pelo menos dois elementos (três nós) na direcção perpendicular ao cordão de soldadura. O rácio entre a disposição dos elementos não deve exceder os 1/10 por questões de método dos elementos finitos. Devem haver elementos suficientes na transversal ao cordão de soldadura de forma a serem cobertas as alterações da energia por unidade de comprimento, [30].

3.2 Sysweld

É um *software* que tem em conta todos os fenómenos físicos decorrentes de uma soldadura. É capaz de calcular o campo de tensões residuais derivadas da soldadura, bem como as suas distorções, historial de plastificação ao longo e após o processo de soldadura e alterações na microestrutura do material, [31].

Neste subcapítulo serão referidos os princípios por detrás do cálculo transiente metalúrgico, térmico e mecânico.

3.2.1 Geometria e malha MEF

A geometria das peças deverá ser feita num *software CAD*, estando o *Visual Mesh* apto para realizar tal tarefa. O cálculo dos fenómenos físicos terá com base a análise MEF de uma malha gerada na geometria da peça. Nas áreas (região do cordão de soldadura) onde é necessário um maior rigor, deverão ser gerados elementos sólidos, podendo as áreas de menor interesse ficar remetidas a elementos de casca (especialmente em casos de placas finas). O *Sysweld* permite processamento em malha de elementos de casca, de elementos sólidos ou uma mistura dos dois tipos, usando funções de forma lineares ou quadráticas, [31].

Elementos sólidos 3D: Consiste numa variação de várias formas sólidas. Geralmente possuem três graus de liberdade de translação em cada nó. A formulação dos elementos não envolve simplificação geométrica, estando limitadas pelos elementos de fronteira, [32].

Elementos sólidos 2D: Consiste em tensões e deformações no plano dada a sua leitura simples em ambiente gráfico. Geralmente tem dois graus de liberdade de translação em cada nó. Podem ser resolvidos modelos com grande número de elementos 2D devido ao seu processamento mais rápido que os 3D, [32].

Elementos de casca 3D: Muito usados para problemas de placas finas. Geralmente para modelos geométricos mais complexos considera-se a superfície a meia espessura, atribuindo aí os elementos de casca. Representam a casca e a membrana numa única superfície, na meia espessura do material. A espessura da casca é definida como uma propriedade constante ou variável ao longo do elemento. Têm três graus de liberdade translacional e 3 graus de rotação possíveis, [32].

Conjunto elementos sólidos – elementos de casca: O *Sysweld* permite a junção destes dois tipos de elementos. Os elementos sólidos são submetidos para zonas próximas e constituintes do cordão de soldadura, já os elementos de casca ficam em áreas exteriores aos efeitos da soldadura, diminuindo o tempo de processamento de um modelo complexo, [32].

Em *Visual Mesh* aquando da geração da malha por MEF de forma automática para elementos do tipo quadrilátero, é possível optar por quatro métodos de elaboração da mesma: *Auto*, *Best*, *Pave* e *Map*, [33].

Auto: Automaticamente procura gerar o algoritmo para estabelecer a melhor malha de MEF para cada superfície. A geração depende da disposição das arestas da malha e da qualidade de malha especificada.

Best: O algoritmo de geração da malha de MEF percorre todos os algoritmos disponíveis para a realização da mesma e introduz aquele que oferece menor quantidade de elementos danificados.

Pave: Utiliza uma geração de malha de MEF por pavimentação, começando a ser realizada a partir do exterior até ao interior das superfícies. O algoritmo *Pave* contém cinco variações: *Default*, *Map-Fill*, *Front*, *Qual*, *Uniform*.

Map: Gera malha de MEF para faces com 3, 4 ou 5 arestas. Não funciona para faces que contenham furos. O algoritmo contém três variantes: *Radial*, *Bi-Radial* e *Default*.

3.2.2 Interligação dos fenómenos físicos

De acordo com [31], durante o processo de soldadura ocorrem vários fenómenos físicos, estando cada um destes dependentes dos outros. A análise mecânica e metalúrgica em *Sysweld* segue este princípio, Figura 64.

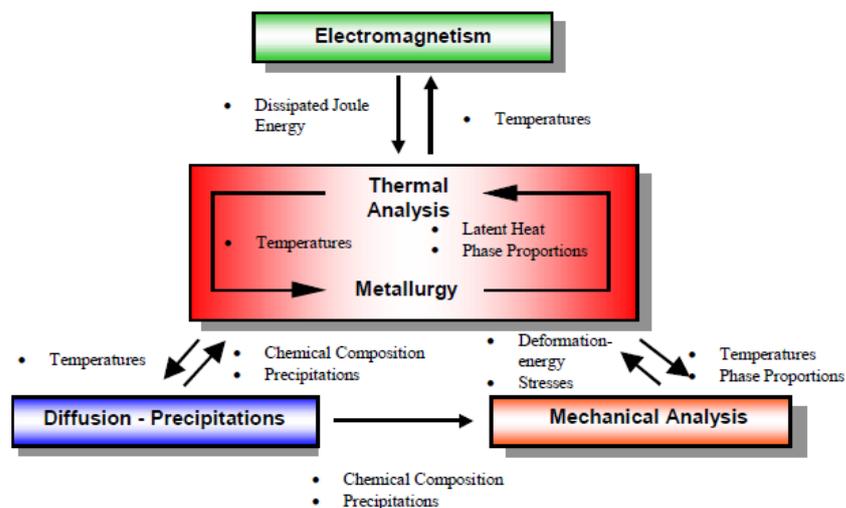


Figura 64 - Interligação de fenómenos físicos Sysweld, [31]

A área do electromagnetismo é referente apenas a processos de soldadura por resistência e processos de endurecimento induzido, [31].

3.2.3 Transferência de calor por condução na peça

Uma análise clássica de condução térmica não linear não é suficiente para descrever os fenómenos de transferência de calor existentes, [31]. A condutividade térmica dos

materiais é afectada não só pelas alterações de temperatura, mas também pela mudança de fase, Figura 65.

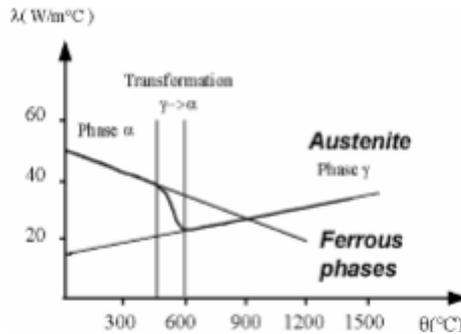


Figura 65 - Condutividade térmica estrutura cúbica de faces centradas γ e estrutura cúbica de corpo centrado α , [31]

O calor latente também é tido em consideração na análise térmica para mudanças de fase química, influenciando o campo de térmico transiente. A análise térmica fica completa com a introdução de modelação não linear de fenómenos de transferência de calor por convecção e radiação nas condições de fronteira, bem como por condução em zonas de contacto, [31].

3.2.4 Transferência de calor da tocha durante o processo de soldadura

A simulação do processo de soldadura tanto pode ser encarada como uma simulação termodinâmica da forma do banho de fusão do material, como uma simulação termo-metalúrgica das tensões residuais e distorções (efeitos térmicos da soldadura), [31]. Portanto quando se fala em análise do processo de soldadura em *Sysweld* estão-se a referir os efeitos que uma determinada fonte térmica produz numa dada peça, tendo em conta as várias atenuantes aqui referidas.

O cálculo da forma do banho de fusão é tratado independentemente da questão das tensões residuais e distorções, [31]. Estas requerem que seja efectivada a entrega térmica no componente, quer através de uma região de solidificação (“*solidus área*”) passante no material ou através de uma fonte térmica analítica específica. A transferência da área de solidificação ao longo da peça na análise termo-mecânica é referida como o método da fonte de calor equivalente, Figura 66.

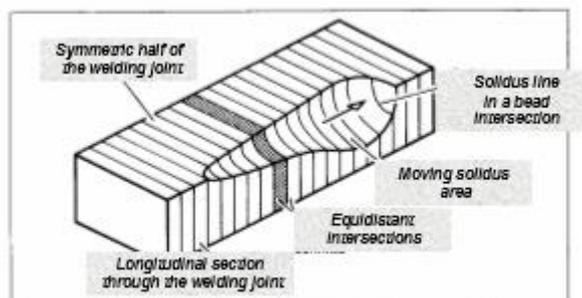


Figura 66 - Método da fonte de calor equivalente

Se a área de solidificação não existir, é então aplicada uma fonte de calor volumétrica de forma a simular a forma do banho de fusão, [31]. Cada tipo de processo de soldadura é caracterizado por uma determinada forma da fonte de calor, [31]. O duplo elipsóide (soldadura MIG-MAG) e o feixe cônico de distribuição Gaussiana (soldadura laser) são exemplos clássicos dos tipos de fonte térmica existentes, Figura 67. O Sysweld dispõe de vários tipos de fontes de calor, facilitando a calibração do modelo ao utilizador. Contudo este não fica dispensado de ajustar os parâmetros de soldadura de forma a obter a região do cordão pretendida, [31].

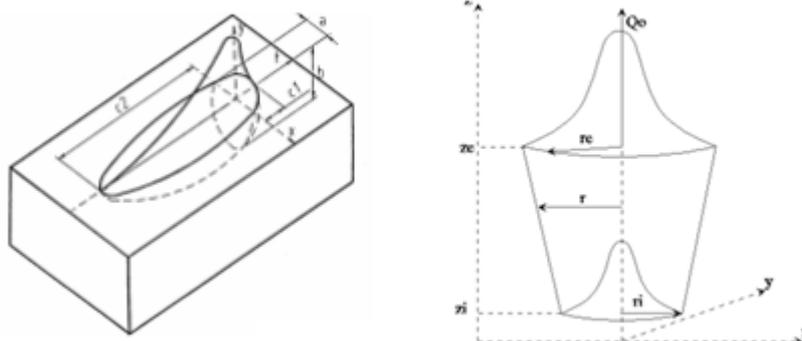


Figura 67 - Fontes de calor duplo-elipsóide e feixe cónico de distribuição Gaussiana, [31]

Estas fontes de calor podem descrever movimentos do tipo translacional, rotacional e helicoidal. O utilizador tem a possibilidade de programar a sua própria fonte térmica, [31].

3.2.5 Alterações microestrutura

As alterações ao nível metalúrgico geram tensões residuais e distorções, estando relacionadas com variações de volume da peça e alterações das propriedades mecânicas. Também está intimamente relacionado com a análise térmica, visto influenciar as propriedades térmicas dos materiais, assim como cada mudança de fase lidar com calor latente, estando presente na equação de condução térmica através da entalpia, [31].

No processo de soldadura, devido ao aquecimento é gerada austenite que será convertida em martensite (elevada taxa de arrefecimento) e bainite (média taxa de arrefecimento), apresentando a martensite propriedades de fractura frágil ao passo que tem uma tensão de cedência elevada. O oposto ocorre para a ferrite, típica do aço que não foi afectado pela soldadura. Esta presença díspar de elementos com propriedades mecânicas diferentes contribui para a complexidade da análise da soldadura, estando todos eles incluídos na análise em Sysweld, [31].

Aços

O grau de austenização é importante para o cálculo das propriedades da ZTA. Durante o aquecimento as fases químicas originadas dependem da temperatura do processo, da

velocidade de aquecimento e do tempo de estágio a cada temperatura, Figura 69. A formação de fases derivadas da estrutura austenítica depende do grau de arrefecimento do processo, Figura 69.

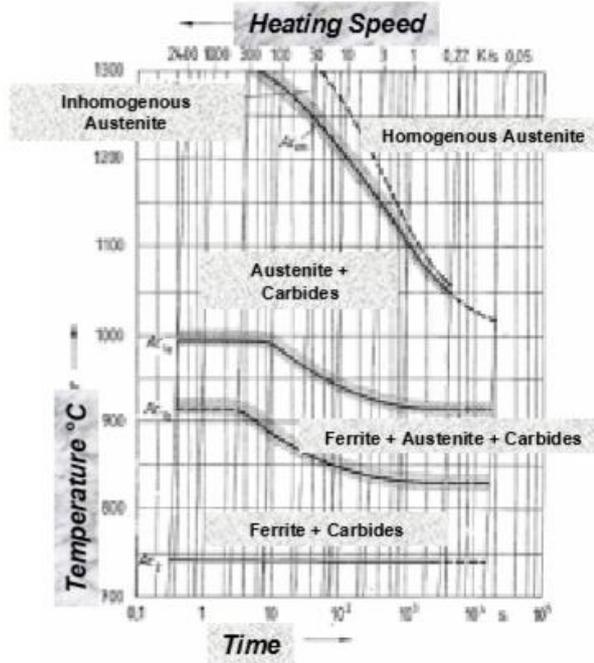


Figura 68 - Gráfico tempo-temperatura para aquecimento contínuo, [31]

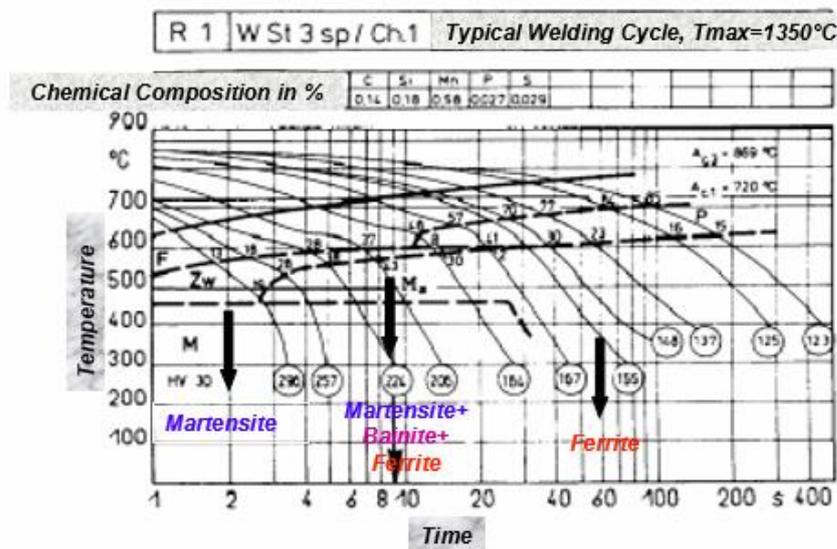


Figura 69 - Formação de fases químicas provenientes de uma estrutura austenítica, função da taxa de arrefecimento, [31]

O *Sysweld* dispõe de vários diagramas temperatura-tempo para cada material, sendo por isso possível face aos parâmetros de soldadura introduzidos, obter uma análise microestrutural rigorosa, [31]. O *software* é ainda baseado em leis de mudança de fase mais complexas, as quais não serão discutidas nesta dissertação.

Alumínios

O *Sysweld* contém modelos que prevêem as perdas de dureza do alumínio resultantes da sua recristalização devidas ao processo de soldadura, Figura 70.

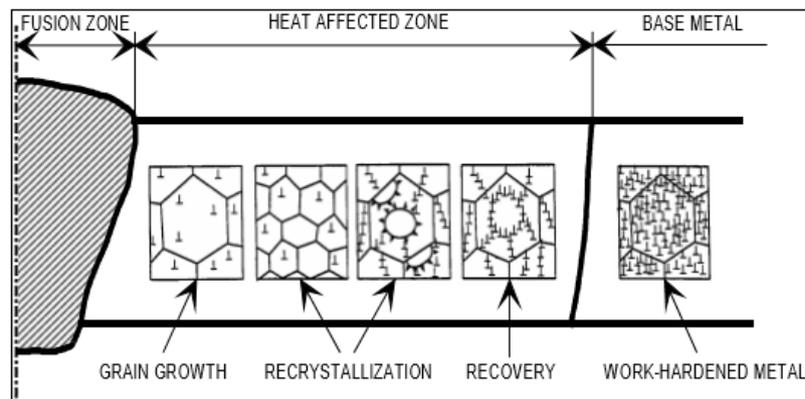


Figura 70 - Recristalização no alumínio, [31]

A recristalização ocorre quando num ciclo térmico a temperatura atingida é superior à temperatura de recristalização. Porém para a análise da recristalização não deverá ser apenas tomada em linha de conta a temperatura atingida, já que o historial térmico será de todo o interesse (tempo de actuação da fonte térmica) para a definição do tamanho de grão. Essa recristalização estará relacionada com alterações de dureza no material, [31].

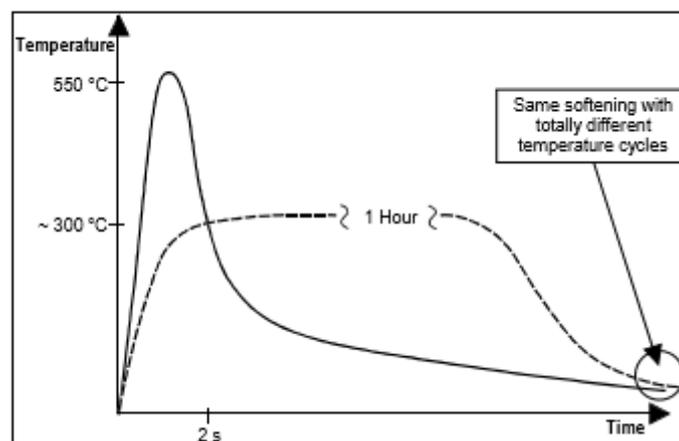


Figura 71 - Ciclos térmicos diferentes para obtenção das mesmas propriedades de dureza, [31]

Como é ilustrado na Figura 71, a temperatura de pico do processo de soldadura não é vital para a aquisição das mesmas propriedades de dureza no material. No final do ciclo térmico as mesmas propriedades de dureza foram obtidas com estágios a temperaturas diferentes.

3.2.6 Modelo estrutural

As variações térmicas causam tensões térmicas devido às dilatações e contracções causadas, [31]. A introdução de material de adição também gerará novas tensões residuais no modelo, as quais terão de ser tidas em conta no *software*. As transformações de fase estrutural também gerarão tensões residuais na peça, visto ocorrer daí uma alteração volumétrica, [31]. A junção destas tensões residuais com as resultantes do processo térmico gera campos de tensões complexos. No *Sysweld* é possível fazer uma separação entre a origem das tensões residuais, [31].

A análise mecânica dos aços é influenciada sobretudo por dois fenómenos microestruturais, [31]:

- *Variações de volume acompanhadas de alterações microestruturais;*
- *Alteração do comportamento mecânico dos materiais em função da fase.*

Todas as expansões térmicas correspondem às expansões térmicas clássicas de cada fase p , e seguem a seguinte, [31]:

$$\varepsilon^{th}(\theta) = \sum_{Phasen} p_i \varepsilon_i^{th}(\theta) \quad (7)$$

Sendo ε_i^{th} a expansão térmica de cada fase i .

Cada fase térmica difere tanto no seu coeficiente de dilatação térmica como na sua posição de origem.

O comportamento do material na análise mecânica é elasto-plástico.

O comportamento visco-elástico é de especial interesse para análise dos efeitos térmicos no relaxamento de tensões. A modelação do endurecimento em função da deformação é muitas vezes feita para processos de rápido aquecimento (soldadura laser p.ex).

No caso da análise mecânica do alumínio, é importante reter que este sofrerá de uma diminuição da tensão de cedência devido à perda de elementos de liga, [31]. Se se aplicar uma relação entre a tensão de cedência e a instabilidade (“*destabilization*”), Figura 72, é possível calcular as distorções e as tensões residuais do componente numa simulação termo-metalúrgica.

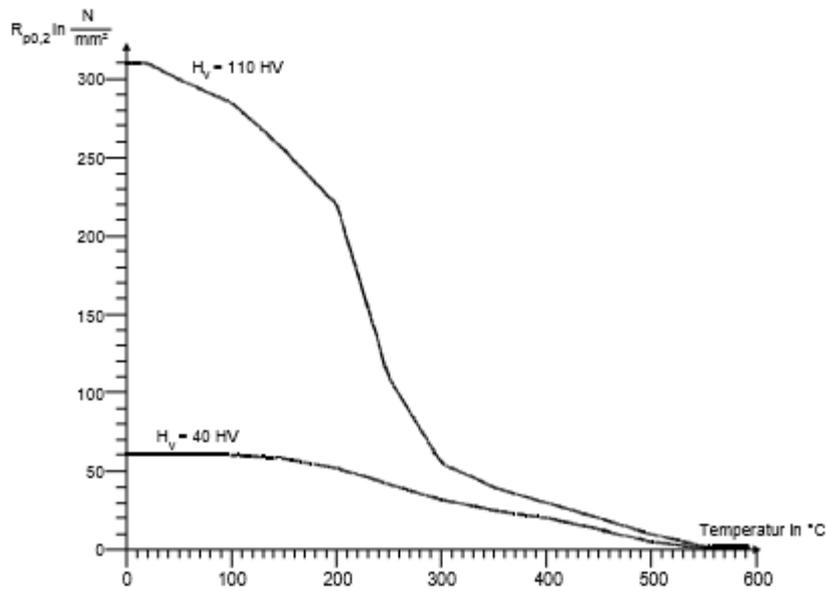


Figura 72 - Relação entre tensão de cedência, dureza de liga de alumínio AlMgSi em estado endurecido e desestabilizado, [31]

Durante o processo de soldadura, o *Sysweld* desactiva o histórico mecânico do material, activando-o depois durante o processo de arrefecimento, [31].

Em testes de dilatometria é visível a alteração do comportamento mecânico do material com o incremento de temperatura a respectiva mudança de fase química.

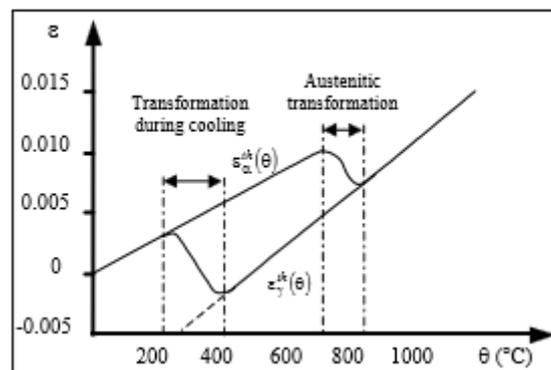


Figura 73 - Ensaio de dilatometria, [31]

No aquecimento durante o processo de formação de austenite, há um decréscimo da deformação do material com o aumento da temperatura. Durante o arrefecimento há um aumento da deformação entre os 400°C e os 200°C, Figura 73. As tensões residuais geradas pela mudança de fase são contabilizadas em *Sysweld*.

Processador, [31]:

O processador utilizado em *Sysweld* é o *Sysworld*, sendo contudo possível a utilização de outros processadores. Os ficheiros gerados no assistente de soldadura em *Visual Weld* serão posteriormente processados na opção *Computation Manager*.

O processador realiza as operações tendo em conta aspectos como, [31]:

- *Dependência de propriedades de material com a temperatura fase e composição química do material.*
- *Influência do calor latente das alterações de fase.*
- *Análise visco-elástica incluindo transformações de fase.*
- *Transformações plásticas.*
- *Fase dependente da relação deformação-endurecimento.*
- *Activação do histórico das propriedades mecânicas da peça durante o arrefecimento.*
- *Não linearidade nas tensões de cedência das fases.*

Pós-processamento, [31]:

Capaz de providenciar informação relativa à evolução de:

- *Tensões residuais.*
- *Distorções.*
- *Taxas de aquecimento e arrefecimento.*
- *Alterações na microestrutura.*
- *Campo térmico.*
- *Deformações plásticas.*

Os resultados estão disponíveis nos pontos de *Gauss*, nos nós (por extrapolação dos pontos de Gauss através da média) e nos nós dos elementos (por extrapolação directamente dos pontos de Gauss), [31].

O número de nós do processamento não é limitado, sendo este restringido em ambiente empresarial devido ao seu custo elevado, [31].

3.2.7 Modelos matemáticos

3.2.7.1 Modelo térmico

A maioria das soldaduras envolve velocidades constantes da fonte de calor. Para tal consideram-se processos em regime permanente. Para a formulação de estados permanentes o *Sysweld* utiliza a equação de Rosenthal, sendo as propriedades termofísicas independentes da temperatura e a fonte térmica movida a velocidade constante, [34]. O modelo de Rosenthal é válido para fontes de calor circular, semi-circular ou elíptico. O *Sysweld* é também capaz de formular soluções não lineares para movimentações da fonte térmica de forma rotacional, translacional e helicoidal, baseados na técnica *SPUG* (*Streamline Upwind Petrov Galerkin*), [34].

Equação de Rosenthal

A equação de Rosenthal está assente sobre vários pressupostos:

Parte da equação fundamental de transferência de calor, [35]:

$$\begin{aligned} \rho C(T) \frac{dT}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(T) \frac{dT}{dy} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(T) \frac{dT}{dz} \right] \\ -\rho C(T) \left(v_x \frac{dT}{dx} + v_y \frac{dT}{dy} + v_z \frac{dT}{dz} \right) &+ Q \end{aligned} \quad (8)$$

1. A fonte de calor move-se a velocidade constante v sob uma direcção x , num plano.

Nessas condições a taxa de calor é dada por, [35]:

$$H = \frac{\eta EI}{v} \quad (9)$$

assim, H é a taxa de calor (J/m), η a eficiência do processo térmico, E a corrente (A), I a tensão (V), v a velocidade da fonte de calor (m/s) e k a condutividade térmica (W/(m.K)).

2. Toda a energia é entregue num único ponto.
3. As propriedades térmicas são constantes (condutividade térmica k e calor específico C_p).
4. O sistema de coordenadas deixa de ser fixo para ser móvel. Substitui-se x por $\xi(X_i)$, sendo ξ a distância desde uma posição fixa em x até à fonte de calor, [35].

$$\xi = x - vt \quad (10)$$

onde t é o tempo e v a velocidade da fonte de calor.

Efectuando as devidas alterações na equação generalizada de transferência de calor, obtém-se a simplificação:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = -\frac{C_p}{k} v \frac{dT}{d\xi} + \frac{C_p}{k} \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

Admitindo um regime estacionário, $\frac{dT}{dt} = 0$

A solução apresentada por Rosenthal para placas finas é, [35]:

$$\frac{d^2T}{d\xi^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = -\frac{C_p}{k} v \frac{dT}{d\xi} \quad (12)$$

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k} * e^{-\frac{v\xi}{2\alpha}} * K_0 * \frac{vR}{2\alpha} \quad (13)$$

onde $q=H$ (J/m), k a condutividade térmica ($J/m \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$), α a difusibilidade térmica (m/s), R a distância da fonte de calor a um ponto particular, K_0 uma função de Bessel de ordem 0.

Para placas espessas a solução é:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi kd} e^{-\frac{v\xi}{2\alpha}} e^{-\frac{vR}{2\alpha}} \quad (14)$$

sendo d a profundidade do cordão de soldadura.

Fonte duplo-elipsóide:

A fonte de calor tipo duplo elipsóide segue o modelo de Goldak.

De acordo com a Figura 67, a fonte de calor de duplo elipsóide segundo o modelo Goldak, é definida analiticamente pela seguinte equação, [36]

$$q_{(x,y,z,t)} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot Q}{a \cdot b \cdot c_{1,2} \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{3 \cdot x^2}{a^2}} \cdot e^{-\frac{3 \cdot y^2}{b^2}} \cdot e^{-\frac{3(z-v \cdot (\tau-t))^2}{c_{1,2}^2}} \quad (15)$$

De acordo com a Figura 67, os parâmetros a calibrar no modelo serão as variáveis a , b , c_1 , c_2 e Q .

Fonte térmica feixe:

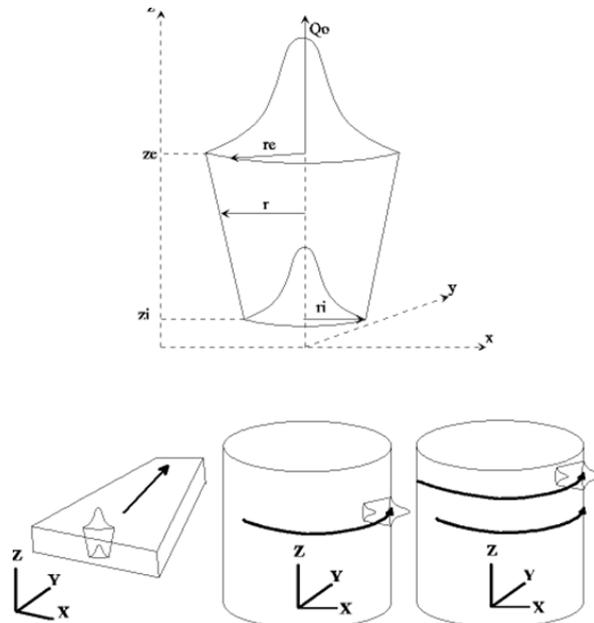


Figura 74 - Fonte térmica feixe, [34]

A fonte térmica de feixe laser com distribuição Gaussiana de temperaturas, é definida pelas seguintes equações, [37]:

$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (16)$$

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e) \quad (17)$$

Modelação numérica fonte laser em modo condução:

Segundo Xiaodong Na, [38] as condições de fronteira consideradas para a modelação numérica baseada em MEF de soldadura laser estão apresentadas na Figura 75.

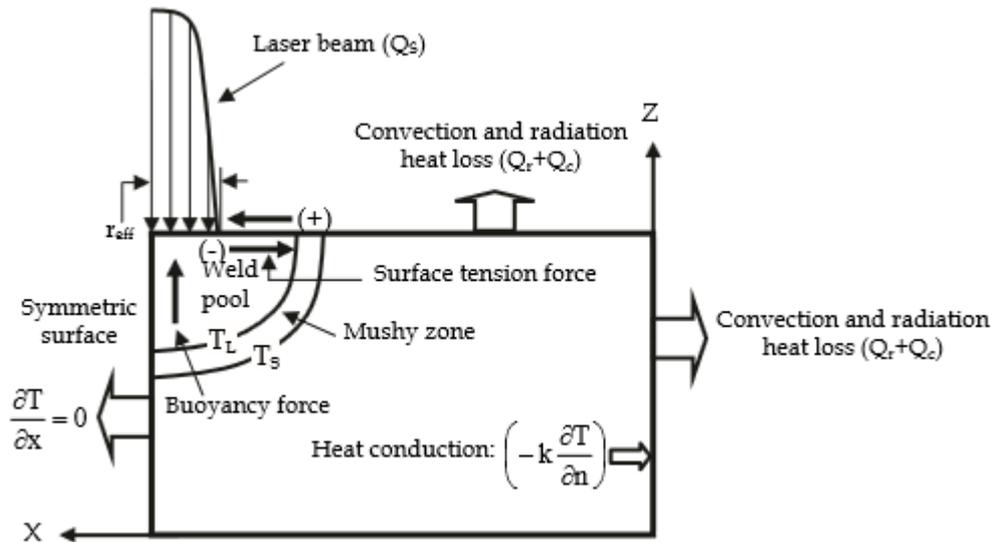


Figura 75 - Condições de fronteira aplicadas à modelação numérica de soldadura laser, [38]

O modo de transferência de calor por condução é representado em regime permanente pela seguinte equação em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial y}{\partial x_m} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_m} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

sendo x_m a distancia ao longo das direcções ortogonais $m=1, 2$ ou 3 (o mesmo que x, y e z). ρ é a densidade e C_p o calor específico. \dot{Q} é a taxa de geração de calor na placa por unidade de

volume. Em regime permanente a velocidade de movimentação da fonte laser é considerada constante (V_w).

Reescrevendo a equação em coordenadas móveis:

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_m} \right) + \dot{Q} = -\rho C_p \left(-V_w \frac{\partial T}{\partial x_s} \right) \quad (19)$$

O balanço térmico à superfície, Figura 75, é expresso por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = Q_c + Q_r - Q_s \quad (20)$$

onde Q_c e Q_r representam as perdas de calor por convecção e radiação pela superfície e Q_s o calor induzido pela fonte laser.

Para evitar dificuldades computacionais relacionadas com o termo da radiação, é considerado um coeficiente térmico efectivo, h_{eff} .

$$h_{eff} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \epsilon \cdot T^{1,61} \quad (21)$$

onde ϵ é a emissividade da peça.

Portanto, o termo relativo à convecção e radiação é expresso da seguinte forma:

$$Q_{c,r} = Q_c + Q_r = h_{eff} (T - T_0) \quad (22)$$

A distribuição de energia à superfície segue uma distribuição Gaussiana expressa matematicamente por:

$$Q_s = \frac{P \eta_c d_1}{\pi r_{eff}^2} \exp \left(-\frac{d_1}{r_{eff}^2} \sum_{m=1}^2 x_m^2 \right) \quad (23)$$

sendo P a potência do laser, η_c o coeficiente de absorção do feixe laser por parte da chapa, r_{eff} o raio efectivo do feixe laser e d_1 o factor de distribuição da densidade de potência da fonte de calor.

Formulação termo-mecânica

Em *Sysweld*, as deformações totais são um conjunto das deformações elásticas (ε_e), visco-plásticas (ε_p), transformações plásticas (ε_{tp}) e termo-metalúrgicas (ε_{th}), [39].

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{tp} + \dot{\varepsilon}^{th} \quad (24)$$

As transformações termo-metalúrgicas são definidas da seguinte forma, [40]:

$$\varepsilon^{th}(T) = \sum_{\text{Phases}} p_k \cdot \varepsilon_k^{th}(T) \quad (25)$$

$$\varepsilon_k^{th}(T) = \alpha_k(T)[T - T_{ini}] \quad (26)$$

sendo ε_k^{th} a deformação térmica da fase metalúrgica k , α_k o coeficiente de dilatação da fase k e p_k a proporção de fase química da fase k .

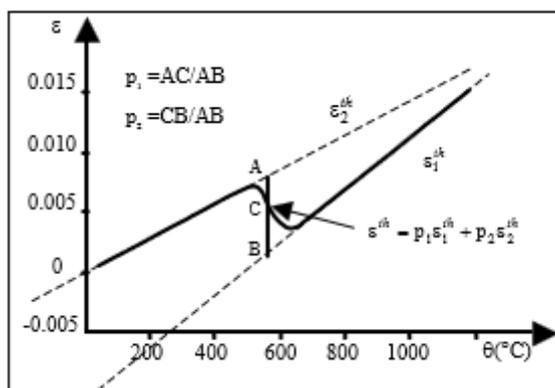


Figura 76 - Deformação termo-metalúrgica, [34]

O *Sysweld* dispõe de vários modelos de forma a medir a proporção de fase em cada instante de tempo ao longo do processo de soldadura.

Os modelos matemáticos utilizados no *software* dividem-se entre os usados para os aços e para os alumínio.

No caso dos aços é feita uma distinção entre dois tipos de transformações. O primeiro é caracterizado pela cinética da transformação difusional (“*Kinetics of diffusional transformation*”) (transformações austeníticas, ferrítico-perlítico e bainíticas) sendo descrita sobre condições isotérmicas da lei de Johnson-Mehl-Avrami, [34].

$$p(T, t) = \bar{p}(T) \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau_R(T)} \right)^{n(T)} \right) \right) \quad (27)$$

onde \bar{p} é a proporção de fase obtido após um instante de tempo infinitesimal à temperatura T , τ_R o instante de tempo entre p e \bar{p} e n o expoente relativo ao tempo de reacção.

A outra tipo de transformação é a transformação martensítica, dependente apenas da temperatura e seguindo a lei Koistinen- Marburger, [34].

$$p(\theta) = \bar{p} (1 - \exp(-b(Ms - T))) \quad (28)$$

com $T \leq Ms$

neste caso, \bar{p} é a proporção de fase obtida a uma temperatura infinitamente baixa, Ms e b caracterizam respectivamente a temperatura inicial de transformação da martensite e a evolução em função da temperatura.

Mais metalúrgicos utilizados em *Sysweld*, de acordo com [41]

- *Modelo Leblond: Soldadura*
- *Modelo JMA: Tratamento térmico*
- *Modelo NANCY: Tratamento térmico*
- *Modelo Leblond generalizado: Soldadura e tratamento térmico*
- *Modelo Koistinen-Marburger: Soldadura e tratamento térmico*

Relativamente às ligas de alumínio, utilizam-se dois modelos metalúrgicos. É necessário ter em conta as perdas de dureza e as alterações das propriedades mecânicas resultantes do processo de soldadura.

Para ligas de alumínio da série 2000, 6000 e 7000, o modelo permite a simulação da dissolução de precipitados, [34]. Estas ligas podem ser endurecidas com recurso a tratamentos térmicos. O seguinte modelo é apenas válido para processos de soldadura.

$$x = \left(\frac{t}{t_r}\right)^n \exp\left[\frac{(Q_s + nQ_d)}{R}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (29)$$

onde χ é a fracção dissolvida do precipitado, T é a temperatura, t_r é o tempo necessário para a dissolução total, Q_s a entalpia da solução metastável e Q_d a energia de activação do processo de difusão do elemento de liga menos móvel.

Para alumínios da série 1000, 3000, 4000 e 5000, os quais podem ser endurecidos por via de deformação, o modelo seguinte permite a simulação das perdas mecânicas devidas à recristalização, [34].

$$x = 1 - \exp\left(-\left[It \exp\left\{-\frac{Q_r}{RT}\right\}\right]^\beta\right) \quad (30)$$

sendo χ a taxa de recristalização, T a temperatura, Q_r a energia para activação da recristalização, β e I dois parâmetros.

3.2.7.3 Modelo termo-metalúrgico

As propriedades térmicas do material são dependentes da fase química e são acompanhadas de calor latente. O *Sysweld* junta esses dois efeitos através da formulação da difusão térmica baseada na entalpia, [34].

$$\rho \frac{dH}{dt} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) - Q = 0 \quad (31)$$

$$\bar{\rho} = \sum_{\text{phases}} p_i \rho_i \quad (32)$$

$$\bar{H} = \sum_{phases} p_i H_i \quad (33)$$

$$\bar{\lambda} = \sum_{phases} p_i \lambda_i \quad (34)$$

$\bar{\rho}$, \bar{H} , $\bar{\lambda}$ representam respectivamente a densidade, entalpia e condutividade térmica da mistura de fases.

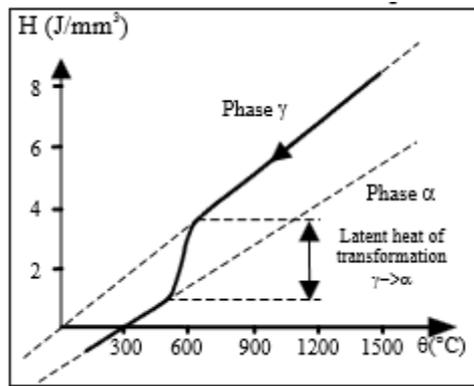


Figura 77 - Entalpia em função da mudança de fase, [34]

A entalpia de cada fase inclui ambos os efeitos da inércia térmica e do calor latente de transformação metalúrgica, Figura 77.

3.2.7.4 Modelo mecânico

Comportamento elasto-plástico dos aços durante as transformações metalúrgicas ocorridas, é expresso em *Sysweld* por uma relação de proporcionalidade, [34]:

$$\dot{\varepsilon}^p = a(\dots)\dot{\sigma} + b(\dots)\dot{\theta} + c(\dots)\dot{p} \quad (35)$$

sendo ε_p as deformações plásticas dependentes das variações de tensão σ , variações de temperatura θ e variações de proporção de fase p . Dos três termos referidos, os dois primeiros representam a taxa de deformação plástica e o último termo representa as transformações plásticas devidas às transformações metalúrgicas.

O *Sysweld* dispõe de três modelos para quantificação de deformações plásticas na presença de transformações metalúrgicas, [34]:

- *Modelo perfeitamente elástico;*
- *Endurecimento por deformação isotrópica;*
- *Endurecimento por deformação cinemática.*

A estrutura metalúrgica e o tamanho do grão austenítico tem influência nas propriedades mecânicas, sobretudo no valor da tensão de cedência, usando a lei de mistura linear para fases ferríticas, [34].

$$\sigma_{\alpha}^y(\theta) = \sum_{\text{Ferritic } \alpha \text{ phases}} p_i \sigma_i^y(T) \quad (36)$$

E a lei não linear para misturas austenite-ferrite, [34].

$$\sigma^y(\theta) = (1 - f(p_{\alpha}))\sigma_{\gamma}^y(T) + f(p_{\alpha})\sigma_{\alpha}^y(T) \quad (37)$$

$f(p_{\alpha})$ é o factor de correcção para proporção de fase ferrítica.

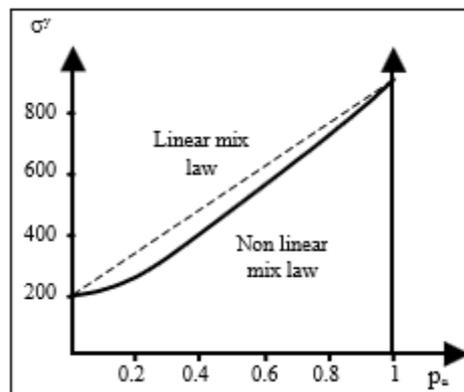


Figura 78 - Comportamento da tensão de cedência função da proporção de ferrite, [34]

As transformações plásticas podem ser atribuídas a dois fenómenos físicos:

- Relação *Greenwood-Johnson*: As diferenças de volume resultantes das transformações de fases geram tensões residuais causadoras de plasticidade na fase mais macia.
- Relação *Magee*: na presença de tensões externas, a estrutura martensítica é alinhada segunda uma direcção preferencial, [34] .

As transformações plásticas podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = -\frac{3}{2}K \cdot h \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right) \text{Ln}(p_\gamma) \cdot \dot{p}_\gamma \cdot s_{ij} \quad (38)$$

K é o coeficiente de transformação plástico (deduzido de testes dilatométricos), σ_{eq} a tensão equivalente de von mises, s_{ij} as tensões desviantes do componente (“*the stress deviator componentes*”)

O comportamento viscoelástico do material surge do facto da tensões de cedência das fases químicas serem dependentes da taxa de deformação plástica, [34].

O comportamento viscoelástico de cada fase por ser definido por, [34]:

$$\dot{\varepsilon}_i^{eq} = \left(\frac{\sigma_i^{eq} - k_i(T, \varepsilon_i^{eff})}{K_i \cdot (\varepsilon_i^{eff})^{1/m_i}} \right)^{n_i} \quad (39)$$

onde $\dot{\varepsilon}_i^{eq}$ representa a taxa de deformação visco-elástica da fase química i, ε_i^{eff} um parâmetro escalar de endurecimento por deformação (“*strain-hardening scalar parameter*”), $k_i(T, \varepsilon_i^{eff})$ a tensão de cedência em função da temperatura ou função de ε_i^{eff} . K_i , n_i e m_i são parâmetros referentes ao comportamento visco-elástico.

4. Caso de estudo

O caso de estudo consiste na simulação de uma soldadura topo a topo sem adição de material, Figura 79, pelo método de elementos finitos, utilizando o *software Sysweld 9.5* e *Weld Planner 12.5*. O pré-processamento foi efectuado em *Sysweld* com recurso ao *Visual Mesh* e *Visual Weld*, o processamento utilizou o *Sysworld 2014.0* como *solver* e o pós-processamento foi obtido através do *Visual Viewer*. Já em *Weld Planner*, o pré-processamento foi realizado em *Visual Mesh*, sendo o modelo geométrico importado para *Weld Planner*. Aí foram definidas as condições de fixação e os parâmetros de soldadura. O processamento foi feito por intermédio do *PAM-Crash*, e o pós-processamento por *Visual Viewer*.

Este estudo envolve a implementação do modelo geométrico das chapas a soldar, geração da malha de MEF e determinação do campo de temperaturas, proporção de fase, tensões residuais e distorções. Será ainda feita uma análise do ajuste dos parâmetros de soldadura para os modelos em *Sysweld*.

Apesar da simplicidade da soldadura estudada, este exemplo aborda os conceitos fundamentais dos *softwares* para futuro estudo de soluções mais complexas.

O caso de estudo comparará os modelos e soluções obtidas para uma análise 2D e 3D de uma soldadura topo a topo em *Sysweld*, bem como a implementação e análise de distorções do modelo 3D em *Weld Planner*. Serão feitas referências a três tipos diferentes de condições de fronteira e a implicações que terão nas distorções e tensões residuais da peça.

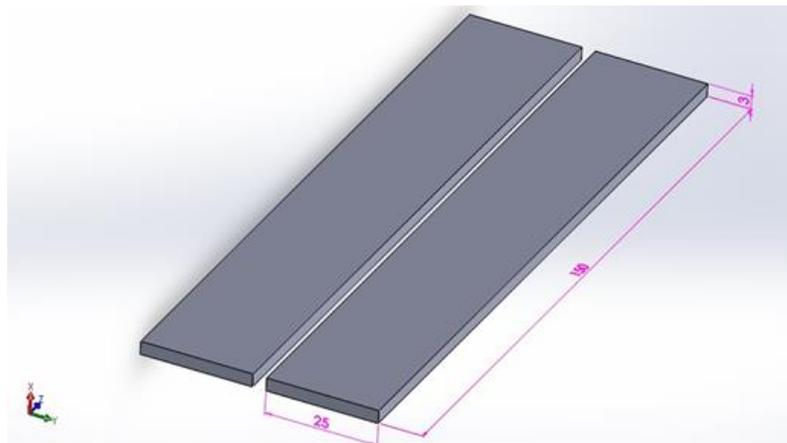


Figura 79 - Dimensões das chapas utilizadas no caso de estudo

Descrição do caso de estudo

- Anteprojecto: Descrição do modelo geométrico, definição da malha de MEF e análise de resultados (comparação 2D e 3D).
- Tipo de análise: mecânica e termo-metalúrgica.
- Tipo de elemento: elementos sólidos.
- Lei do material: elasto-plástica.
- Opções do modelo: condições de fronteira, condições de arrefecimento, sem forças externas aplicadas, sem condições de contacto definidas.
- Resultados: campo de temperaturas, proporção de fase, tensões residuais, distorções.

Informação prática

- *Software* de pré-processamento, processamento e pós-processamento utilizados:
- *Visual Mesh*: geração da geometria, malha e grupos em *Sysweld e Weld Planner*.
- *Visual Weld*: definição do processo de soldadura em *Sysweld*. Atribuição da linha de soldadura, condições de aperto, material de base e de adição, forças externas, contactos, parâmetros de soldadura e arrefecimento.
- *Sysworld*: *software* de processamento do *Sysweld*.
- *Visual Viewer*: análise de resultados *Sysweld e Weld Planner*.
- *Weld Planner*: *software* de pré-processamento e possível pós-processamento simplista. Gere dados da importação da malha de MEF de *Visual Mesh*, possibilita a criação de soldaduras, edição de condições de fixação, elaboração de sequência de soldadura.
- *Pam-Crash*: *software* de processamento do *Weld Planner*.

Dados do problema

- Unidades: mm, s, J, °C.
- Descrição: soldadura topo-a-topo sem material de adição.
- Processo de soldadura: arco-eléctrico.
- Material: aço S355J2G3, propriedades a 20°C [1]: $E = 216 \times 10^6$ MPa; $\nu = 0,3$; $\rho = 7819,8 \text{ km/m}^3$, Figura 80.

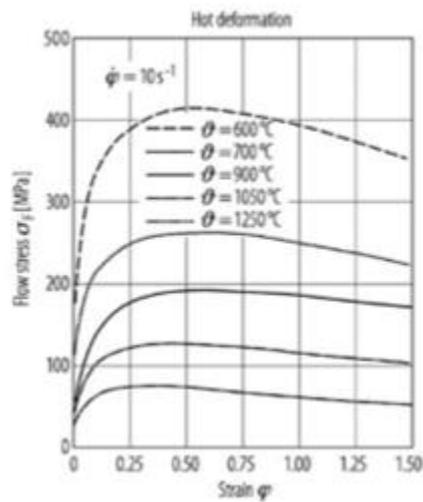
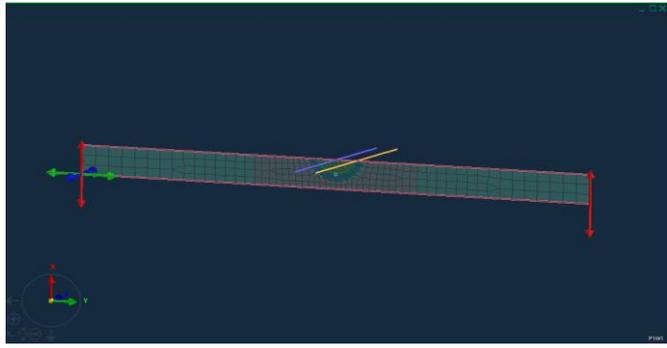
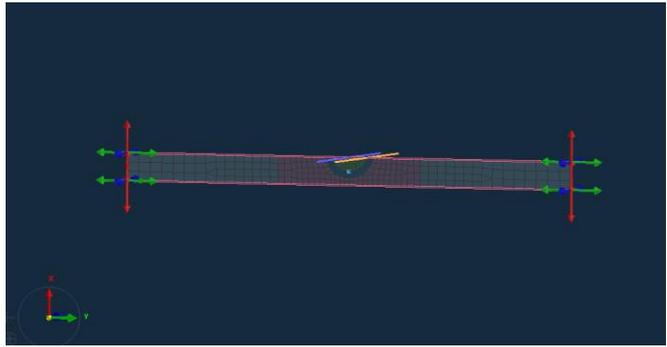


Figura 80 - Propriedades do aço S355J2G3 para deformação a quente, [2]

- Parâmetros de soldadura iniciais: velocidade: 8 mm/s; energia por unidade de comprimento: 280 J/mm; eficiência do processo: 70%.
- Dimensões cordão de soldadura: comprimento: 8 mm; largura: 4 mm; penetração: 1,5 mm.
- Arrefecimento: em ar. Temperatura ambiente 20 °C.
- Condições de aperto: válidas para modelo 2D e 3D (condições duplicadas para os restantes vértices da placa)

Tabela 19 - Condições de fixação do caso de estudo

Condição de aperto	Fixação
1 – Fixação nos vértices inferiores em todas as direcções.	

<p>2 – Fixação em todas as direcções no vértice de origem e restrição de movimento segundo Y no vértice inferior direito.</p>	
<p>3 – Fixação em todas as direcções nos quatro vértices da placa.</p>	

4.1 Caso de estudo 2D

A simplicidade nos processos de engenharia muitas das vezes deve ser a solução óptima no que respeita ao custo/benefício. De uma soldadura topo a topo é possível fazer uma análise 2D de uma secção de corte da placa, reduzindo o tempo de processamento e consecutivamente o custo da operação, garantindo-se por vezes resultados muito satisfatórios.

Será objecto de análise a comparação do perfil de temperaturas, campo de tensões residuais com um caso 3D posteriormente descrito. O campo de deslocamentos não será alvo análise dadas as limitações do modelo 2D nesse aspecto.

4.1.1 Lista de partes

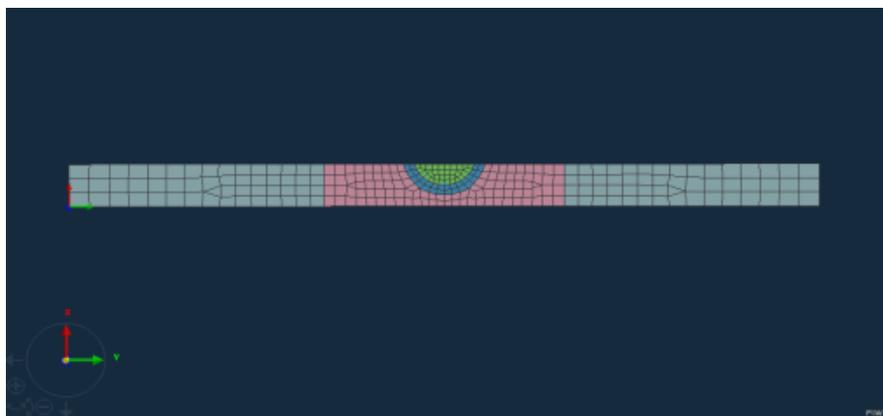


Figura 81 - Perspectiva final do caso de estudo 2D

São apenas consideradas duas placas, Figura 79. Devido à simetria existente, foram inseridas na mesma identificação. É considerada uma secção de corte das chapas unidas, referidas na Figura 81.

4.1.2 Pré-processamento do modelo

Serão descritos neste subcapítulo os passos necessários desde a elaboração da geometria, passando pela geração da malha até à preparação do modelo para a fase do processamento.

4.1.4.1 Geometria

De forma a evitar erros durante o processamento do *Sysweld*, foi recomendado pela *ESI Hispania* a implementação da chapa no plano XOY. O modelo 3D abordado posteriormente seguirá esta mesma consideração.

Abrindo o *software Visual Mesh*, num documento em branco, começa-se por definir os pontos de forma a gerar a superfície de corte das chapas, Figura 82, na ferramenta “*Node – By XYZ, Locate*”.

Tabela 20 - Coordenadas dos pontos gerais do caso e estudo 2D

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)
1	0	0
2	3	0
3	3	50
4	0	50



Figura 82 - Pontos gerais do caso de estudo 2D

Para se gerar uma superfície com base nos 4 pontos gerados, Tabela 20, usar a ferramenta “Surface – Blend (Spline)” na opção “Smooth Points”, Figura 83. É necessário atribuir uma identificação à superfície gerada (*Part ID*), caso contrário será automaticamente atribuída a *Part ID 1*.

De seguida a placa total foi dividida nas suas duas constituintes e foi gerado o local correspondente à zona do cordão de soldadura e zona de transição de tamanho dos elementos finitos. Para tal foram definidos novos pontos, Tabela 21, obedecendo à lógica anteriormente vista para sua atribuição.

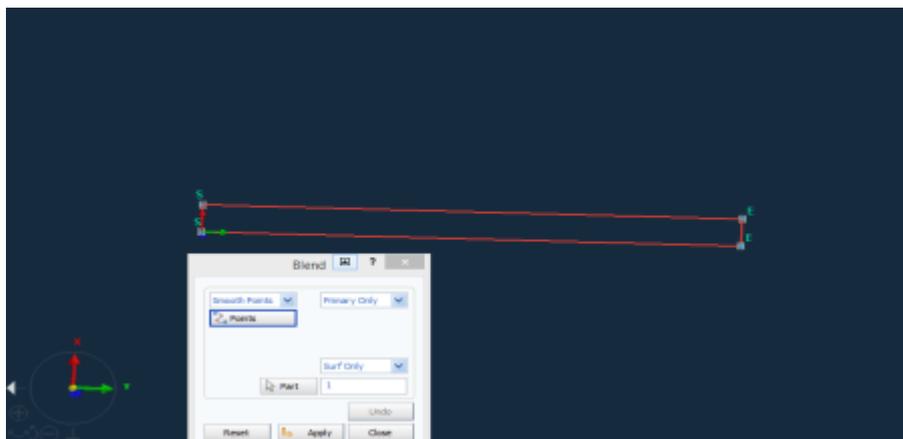


Figura 83 - Criação da superfície inicial

Tabela 21 - Coordenadas dos pontos auxiliares do caso de estudo 2D

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)
5	3	25
6	0	25
7	3	23
8	3	27
9	1,5	25
10	0	17
11	3	17
12	0	33
13	3	33



Figura 84 - Pontos auxiliares

A separação das placas será feita através da ligação dos pontos 5 e 6, recorrendo à ferramenta “Curve – Sketch”, Figura 85. De forma a manter tudo compilado na mesma *Part ID*, será necessário alterar a mesma na janela da ferramenta utilizada. Caso contrário, assumirá uma *Part ID* diferente da definida aquando da geração da superfície (passo anterior).

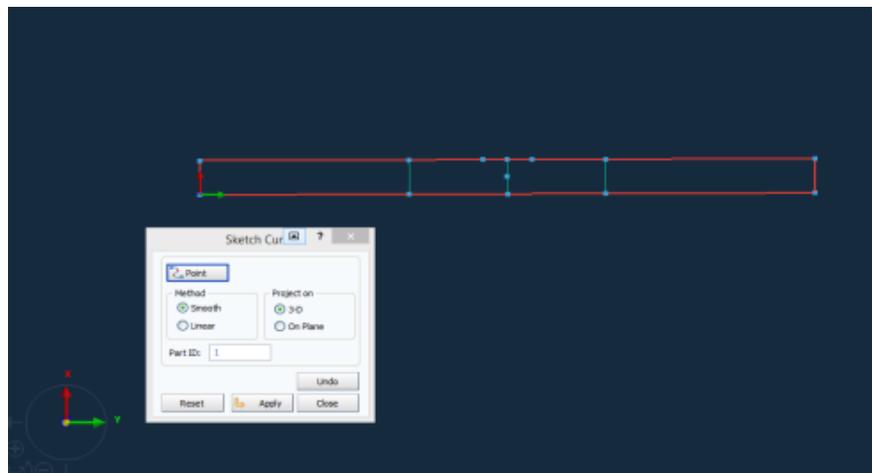


Figura 85 - União dos pontos auxiliares #1

A zona do cordão de soldadura será delineada por um arco entre os pontos 7, 8 e 9, Figura 86. Esse arco é gerado na ferramenta “Curve – Circle/Arc”, na opção *Arc* e método *3Points*.

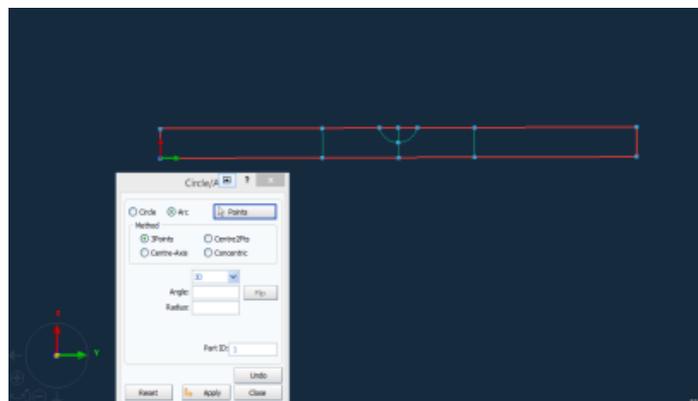


Figura 86 - União do cordão da referência do cordão de soldadura

Para necessidade de refinamento da malha de MEF na região envolvente à zona correspondente ao cordão de soldadura, é criado um *offset* de 0,7 mm, Figura 87, de forma a poder ser feita uma transição do tamanho do elemento mais suave. Esse *offset* é criado em “*Curve – Circle/Arc*”, opção *Circle, Concentric*, com *Offset* de 0,7. De forma a ser criado um arco será necessário eliminar o excedente da curva, para tal usa-se a ferramenta “*Curve – Trim/Split*”, seleccionando a opção *curve* de forma a seleccionar a linha a amarelo representada na Figura 88. Esta é uma forma de realizar esta operação, havendo outras alternativas credíveis.

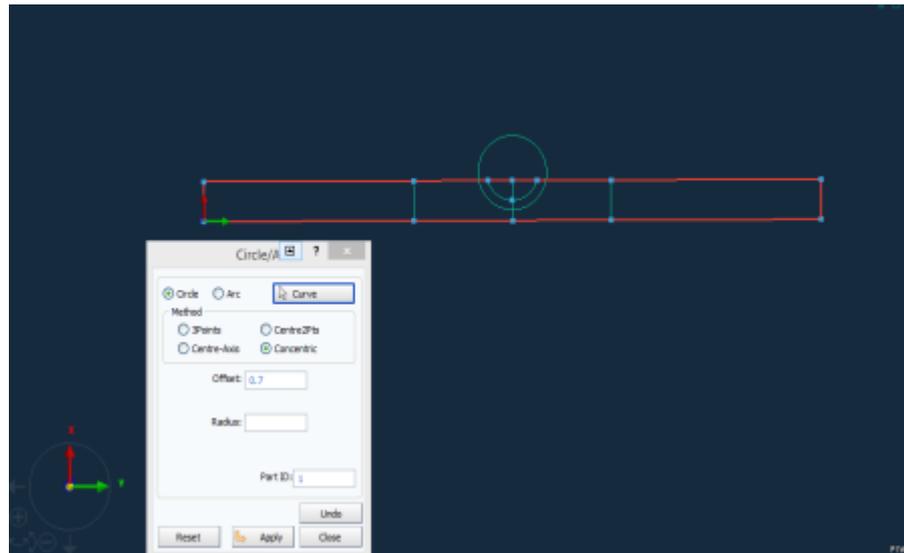


Figura 87 - Criação de circunferência de refinamento da envolvente do cordão de soldadura

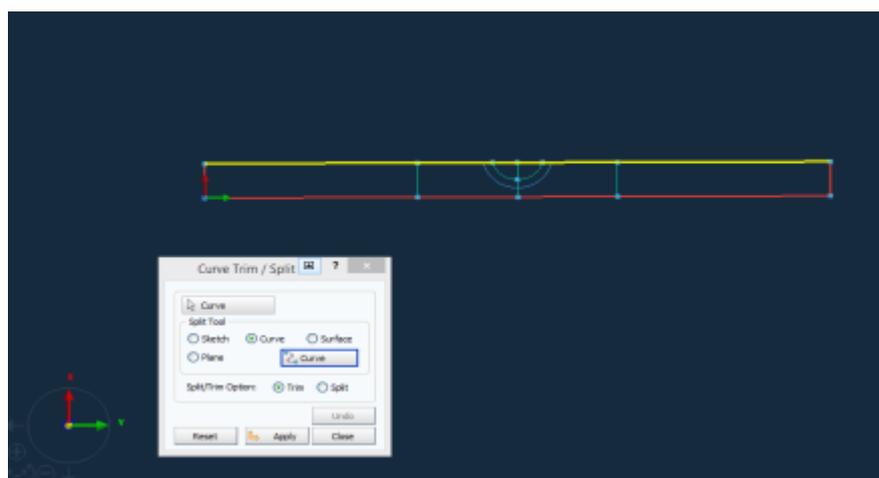


Figura 88 - Eliminação do excesso da circunferência

Para finalizar a questão da geometria do modelo 2D, é necessário dividir a superfície gerada (a vermelho) pelos vários elementos entretanto criados. Para tal, usar a ferramenta

“Surface – Split”, na opção *Split by curves*, seleccionando primeiramente a superfície representada a vermelho e de seguida todos os elementos caracterizados por *curves* (rectas e arcos).

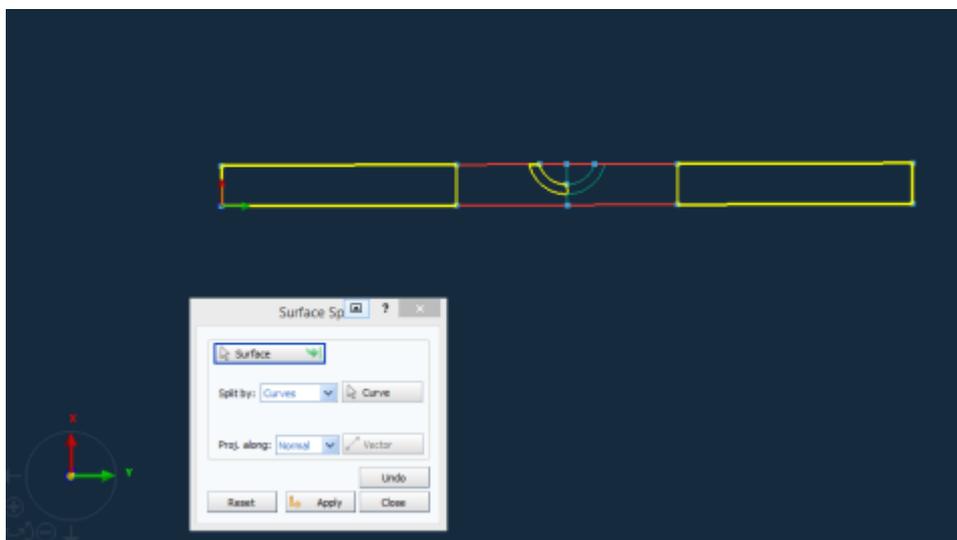


Figura 89 - Divisão da superfície de referência em várias divisões

A peça fica então com a superfície dividida entre as linhas criadas, podendo cada uma ser seleccionada separadamente, Figura 89.

4.1.4.2 Geração da malha em *Visual Mesh*

Ainda no *Visual Mesh* é criada a malha de método de elementos finitos para a secção de corte 2D. Esta será dividida em diferentes zonas, sendo a correspondente à do cordão de soldadura a que será objecto de maior refinamento. Esta deverá ter um número mínimo de quatro elementos em profundidade, [42]. A transição do tamanho de elemento desde a zona do cordão de soldadura até à periferia da peça deverá ter incrementos suaves, daí ter sido criados uma zona de transição em redor do cordão de soldadura.

Dada a simetria da peça, a malha será criada apenas para metade da peça, sendo posteriormente feita a simetria da mesma. Desta forma garante-se que os elementos serão simétricos, o que não aconteceria se a malha fosse realizada por inteiro em simultâneo.

No comando “2D – Automesh surfaces” começa-se por seleccionar uma das metades da zona do cordão de soldadura. Como se pretendem no mínimo quatro elementos em profundidade, o tamanho do elemento *Set Element Size* deverá ter o valor de 0,4. O valor do número de elementos em cada aresta estará contabilizado ao longo da mesma, Figura 90.

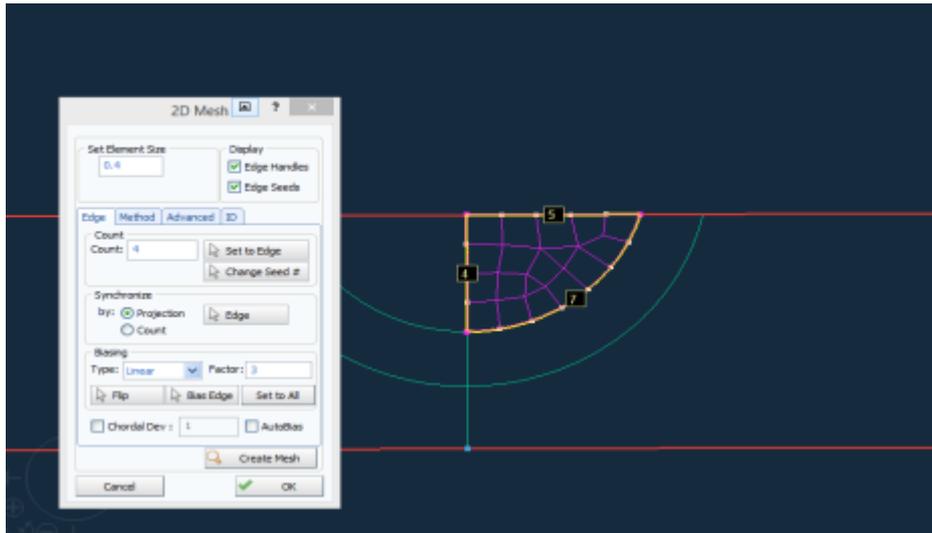


Figura 90 - Geração da malha de MEF em metade do cordão de soldadura

Na janela da ferramenta *Automesh Surfaces*, é possível escolher o tipo de elemento a utilizar bem como o método de disposição dos mesmos. De forma a obter o máximo de elementos quadriláteros (pouco distorcidos) possível, na janela *Method*, selecciona-se o tipo de elemento *Quad-Linear* e o método *Best*, Figura 92.

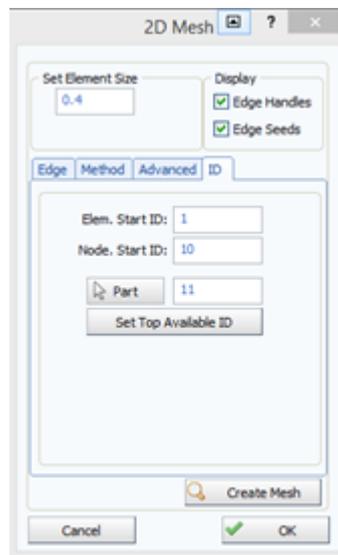


Figura 91 - Parâmetros da malha MEF cordão de soldadura #2

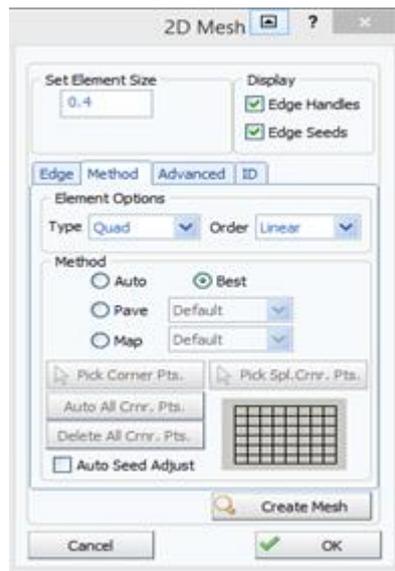


Figura 92 - Parâmetros da malha MEF cordão de soldadura #1

Para atribuição de uma identificação à malha criada, na janela *ID* é possível realizar essa operação, digitando o número pretendido no campo *Part* e clicando no mesmo botão, Figura 91.

Ao clicar em *Create Mesh* está-se a dar ordem para a criação da malha, podendo esta sofrer alterações sem necessidade de eliminar a malha anteriormente criada, pois a mesma não ficará gravada na base de dados. De forma a gravar será necessário clicar em *Ok*.

Na zona envolvente ao cordão de soldadura a atribuição da malha será semelhante (mesmo tipo de elemento e método), optando-se por alterar a *Part ID* de forma a não fundir esta malha com a anterior. A ter em conta na janela *Advanced* a opção *Across Part* que fará a ligação com os elementos da malha anterior, exibindo o número de elementos a vermelho de forma a respeitar o número de elementos de fronteira existentes, Figura 93.

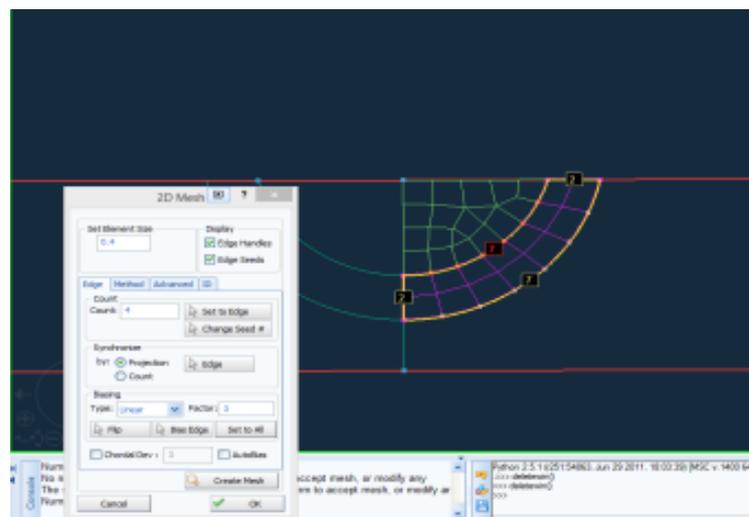


Figura 93 - Geração de malha MEF zona envolvente cordão de soldadura

O número de elementos na curva exterior da região a refinar foi propositadamente deixado a 7 de forma a ir aumentando o tamanho do elemento. Para tal na janela *Edge*, secção *Count*, foi escolhido o número correspondente ao número de elementos da fronteira, sendo depois aplicado à mesma clicando no botão *Set to Edge* e na fronteira pretendida.

Na zona de periferia da soldadura, a malha gerada conseguida de melhor qualidade foi gerada pelo método *Auto*. Esta malha foi identificada com a *Part ID 13*. As fronteiras contendo o número de elementos 9 e 13, foram alvo de refinamento localizado linear, sendo este realizado com recurso à ferramenta *Bias – Linear (factor 1,5)* presente na janela *Edge*, secção *Biasing*, Figura 94 e Figura 95.

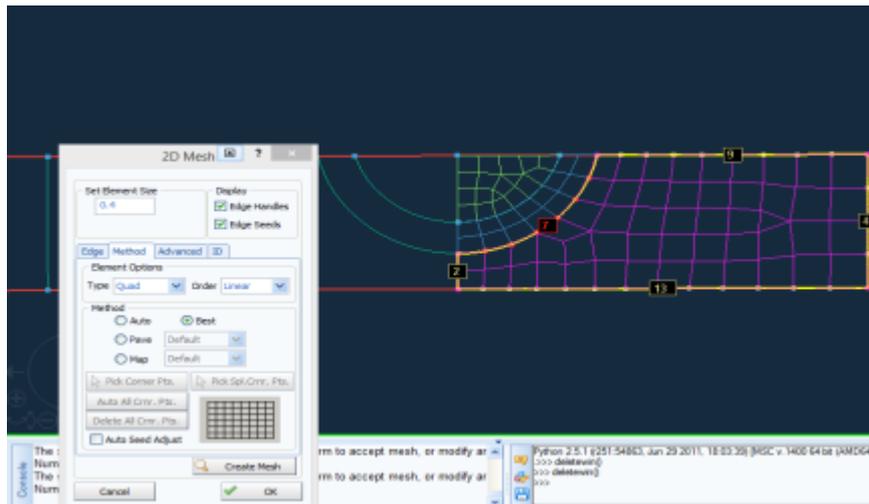


Figura 94 - Parâmetros malha MEF zona transição para periferia da peça #1



Figura 95 - Parâmetros malha MEF zona transição para periferia da peça #2

A zona mais periférica da peça será a que terá um tamanho de elemento maior, já que não será uma zona de grande interesse na análise de resultados. Deve-se obedecer a uma transição gradual no aumento do tamanho dos elementos 2D.

A *PartID* será a 14 e o método de geração da malha de elementos finitos será o método *Best*. O *Bias – Linear* terá igualmente um factor de 1,5, Figura 96.

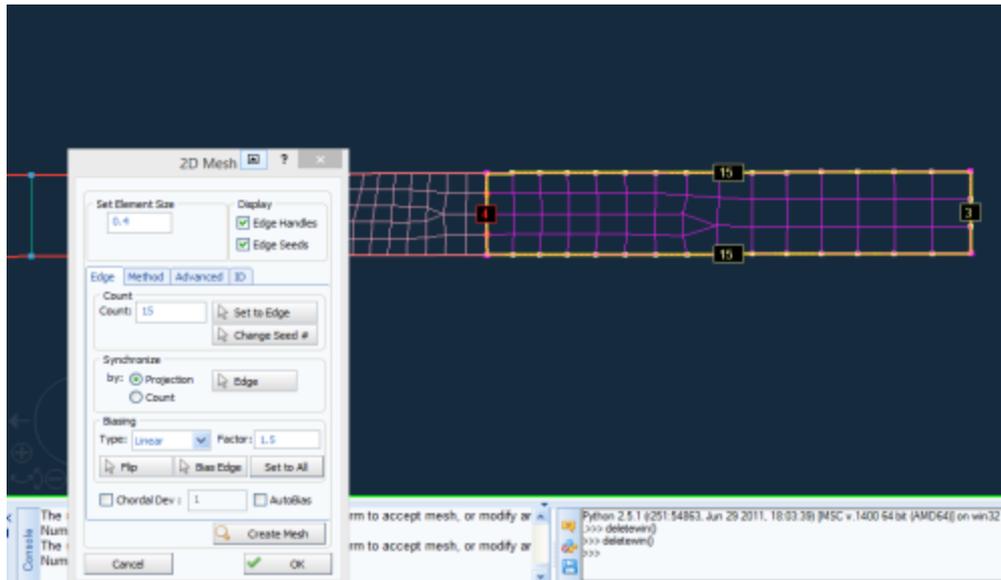


Figura 96 - Parâmetros da malha MEF periferia da peça

Separadas as malhas geradas em *Parts ID* diferentes, é necessário duplicar as mesmas de forma a abranger toda a secção de corte, Figura 98.

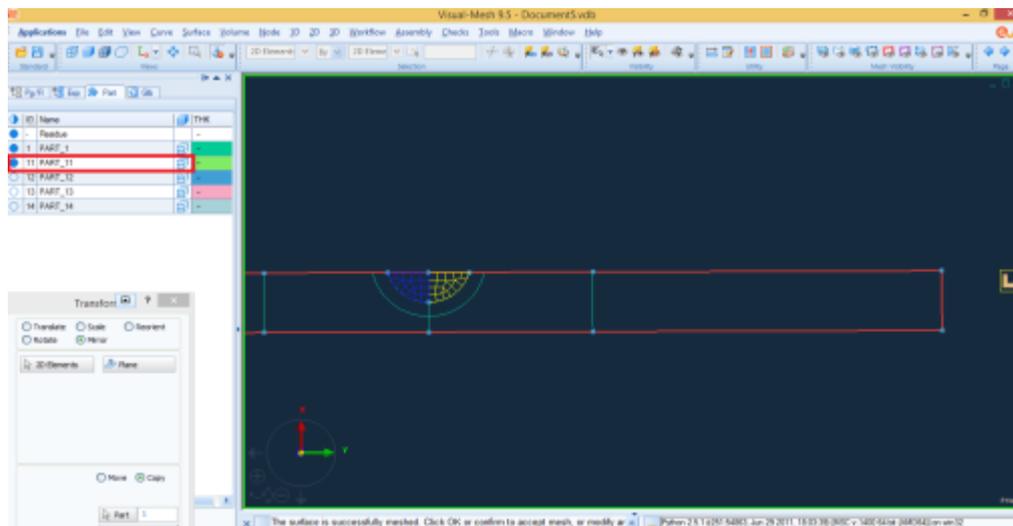


Figura 97 - Duplicação dos elementos 2D do cordão de soldadura

A forma mais prática de duplicar será exibir apenas a *Part ID* em causa a duplicar (representado a vermelho na Figura 97). No comando “2D – Transform” selecciona-se a opção *Mirror*, o plano para efectuar o mesmo (eixo YY), a identificação da peça (*Part ID* comum à original de forma a fundir ambas numa única) e a opção *Copy*. Após a selecção destes parâmetros, é dado a escolher os elementos 2D a transpor. Após escolhidos, clicar em *Copy* para obter o resultado final, Figura 98.

O processo é repetido de igual forma para as duas restantes malhas geradas, obtendo-se o resultado final da Figura 99, em vista *Smooth Wireframe*.

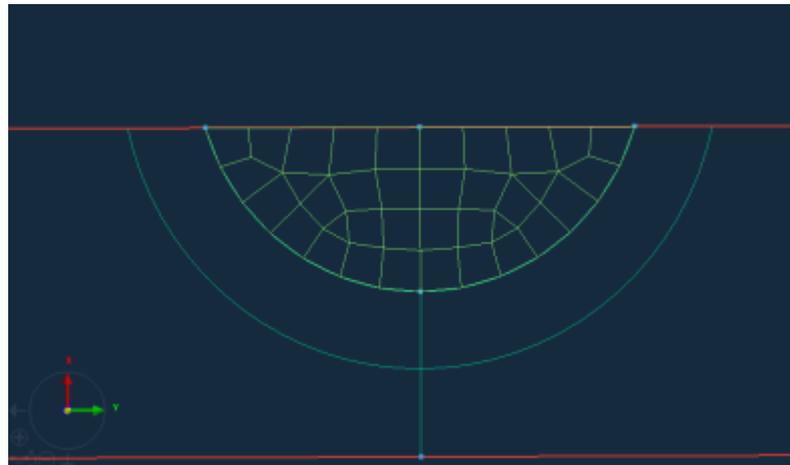


Figura 98 - Aspecto dos elementos 2D do cordão de soldadura

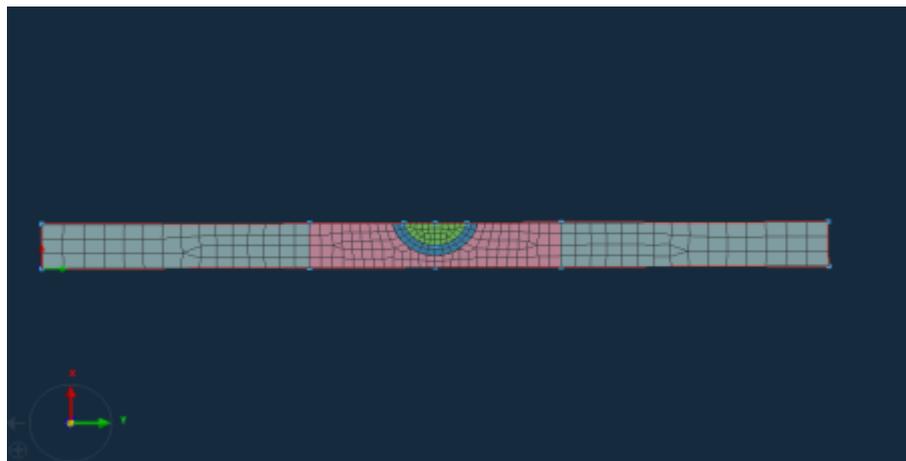


Figura 99 - Malha MEF final do caso de estudo 2D

4.1.4.3 Correção e qualidade da malha

Os processos de criação e duplicação das malhas de elementos finitos geraram nós coincidentes que deverão ser prontamente eliminados de forma a garantir a união dos elementos para operações futuras. Para tal no menu “*Checks – Coincident Node*” no botão *Check* são exibidos os nós sobrepostos que será fundidos ao pressionar o botão *Fuse All – Apply*, Figura 100.

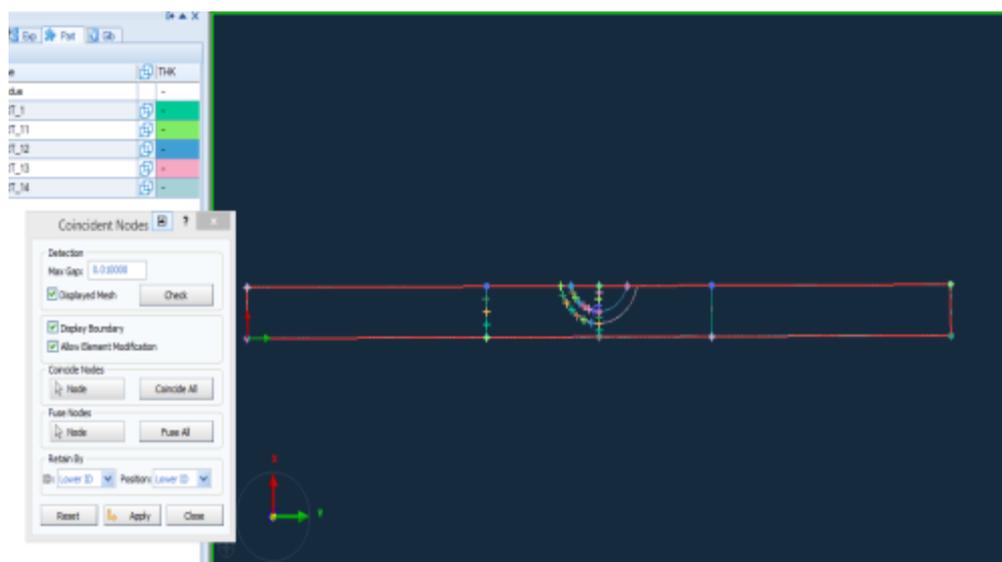


Figura 100 - Nós coincidentes

A qualidade da malha de elementos finitos poderá ser visualizada e corrigida na ferramenta “Checks – Element Quality”, escolhendo o tipo de elementos 2D e pressionando o botão *Check*.

Na coluna *Value*, é possível definir os valores dos campos em questão para a malha de MEF do modelo. Por exemplo no campo *Min Side Length* define-se o tamanho mínimo da aresta do elemento, caso defina um valor superior ao menor elementos da malha, na operação *Check*, o *software* indicará violação do tamanho mínimo da aresta do elemento. Como para o caso em estudo esse tipo de variável não tem interesse extra, o campo é desactivado da análise (seleccionado com *Off*), Figura 101.

Realizado esse procedimento, e clicando no botão *Auto Correct*, a malha foi alterada sendo o número de elementos defeituosos reduzido de 2,19% para 1,46%, Figura 102.

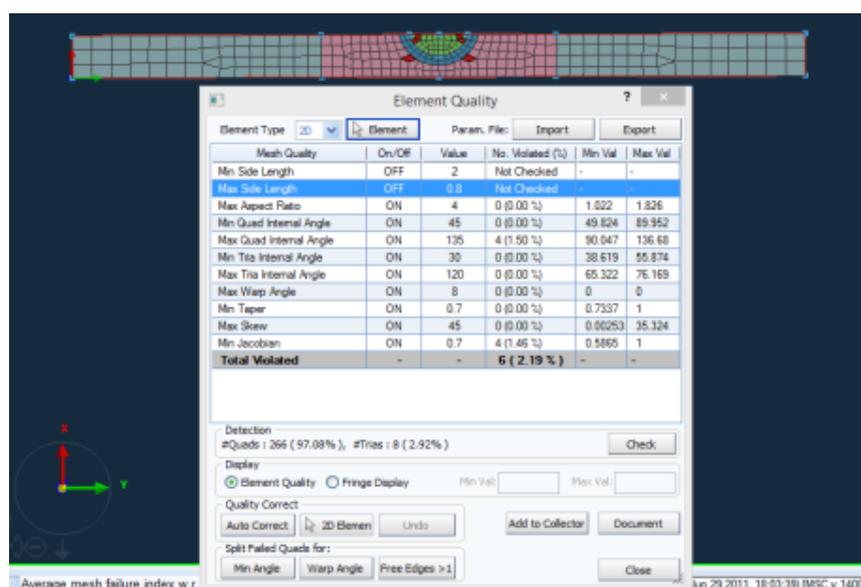


Figura 101 - Qualidade da malha MEF #1

4.1.4.1 Criação de grupos

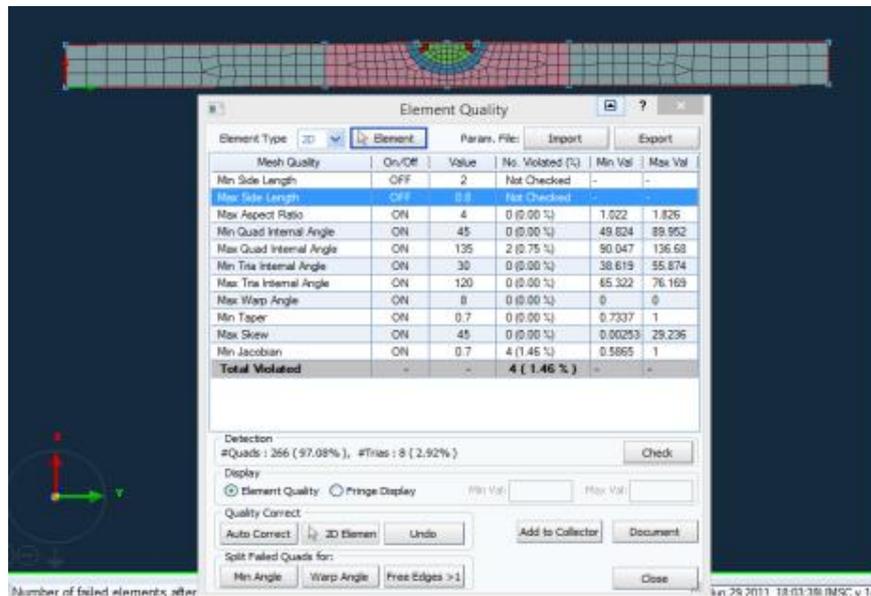


Figura 102 - Qualidade da malha MEF #2

Os grupos (*collectors*) são conjuntos de elementos e/ou nós que terão utilidade para definir as propriedades do material, soldadura, fixação e contacto a atribuir posteriormente. Um erro muito comum é atribuir tipos de elementos a grupos que não estarão seleccionáveis como pretendido, para tal é necessário ter a noção de quais os elementos a seleccionar para os respectivos grupos. Por exemplo para condições de fixação e contacto, deverão ser utilizados nós. Para definição de material, deverão ser usados elementos 2D (neste caso) ou elementos 3D (para o caso de estudo posteriormente abordado).

A forma de alternar na selecção do tipo objecto é através da barra de selecção do *software*. O primeiro campo é referente ao alvo (*Target List*) e o segundo campo de selecção é relativo à lista de referência (*Reference List*), Figura 103.



Figura 103 - Barra de selecção

Os elementos 2D de cada metade da peça devem ser agrupados em separado, de forma a possibilitar a atribuição de materiais diferentes aos mesmos. A atribuição do grupo é feita através do clique no botão direito no rato, opção *Tools – Add to new collector*, Figura 104.

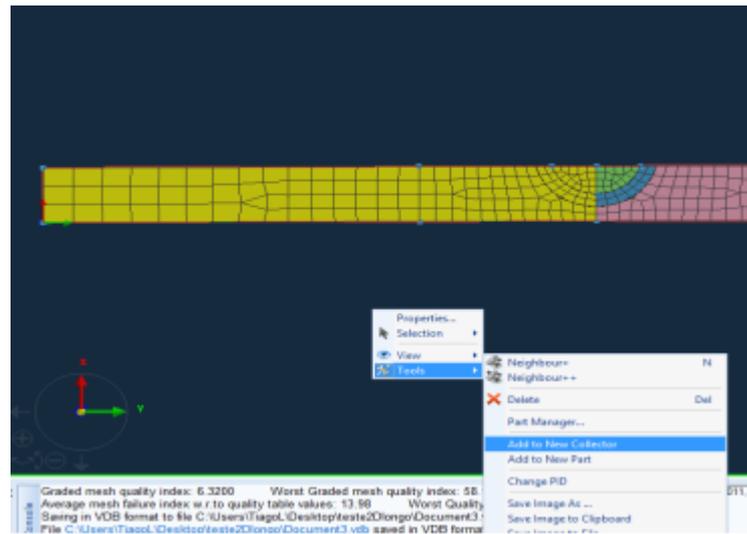


Figura 104 - Geração de grupo de elementos 2D para definição das propriedades do material

A zona correspondente ao cordão de soldadura é também atribuída a um grupo. De forma a facilitar o processo de selecção dos seus elementos 2D, no menu lateral *Explorer*, é atribuída visibilidade unicamente à *Part ID* correspondente ao cordão de soldadura, Figura 105.

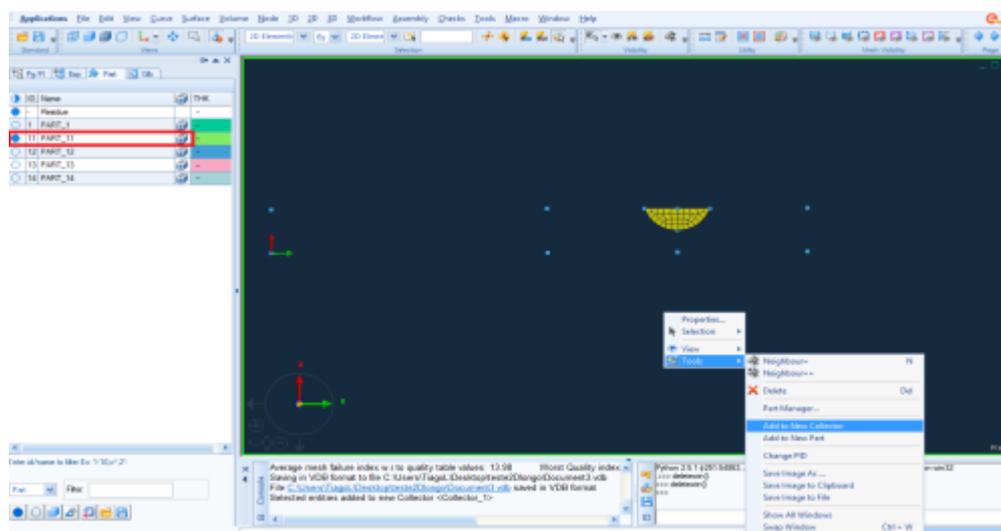


Figura 105 - Grupo de elementos 2D referentes ao cordão de soldadura

Os vértices inferiores serão os escolhidos para a fixação. Como foi anteriormente dito, para a fixação deverão ser escolhidos nós. Cada nó terá que ser atribuído a um grupo individual de forma a ser possível a total manipulação das condições de fixação no *Visual Weld*, Figura 106.

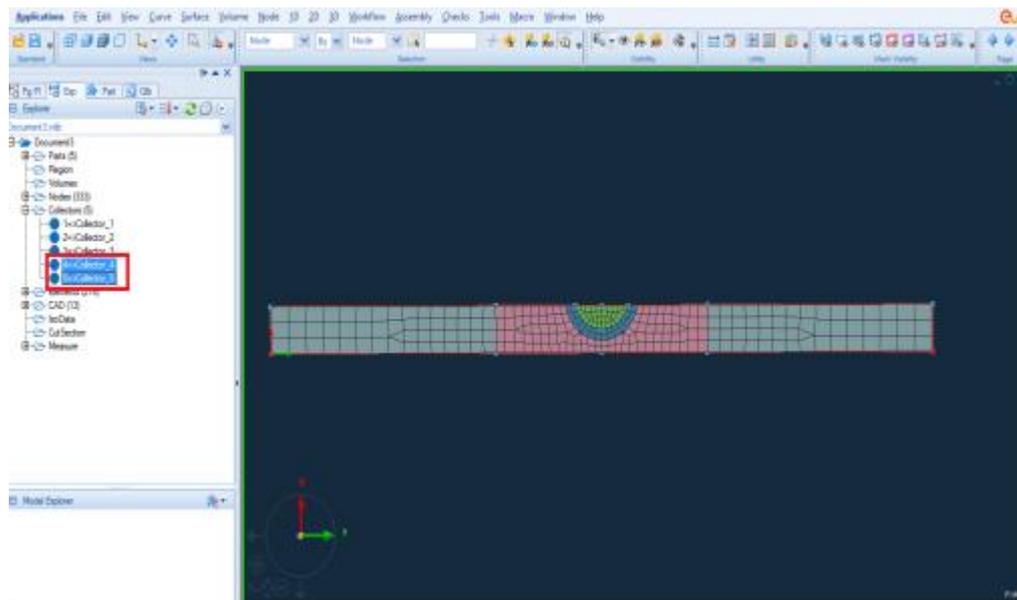


Figura 106 - Grupos individuais criados

Finalizado o conjunto de etapas para elaboração da geometria a malha de MEF, o ficheiro deverá ser salvo em extensão *.vdb* e colocado numa pasta à escolha. Essa parte não deverá conter espaços a separar palavras, pois isso estará na origem de erros que mais à frente serão abordados.

ID	Name	Entity Count	Entity Type
28	COLLECTOR_1	137	Element
29	COLLECTOR_2	36	Element
30	COLLECTOR_3	137	Element
31	COLLECTOR_4	1	Node
32	COLLECTOR_5	1	Node
6	J01_PATH	2	Element
7	J01_REF	2	Element
8	J01_SNO	2	Node
9	J01_END	2	Node
10	J01_SEL	2	Element

Figura 107 - Editor de grupos

É possível a supervisão do tipo de grupos activos no modelo na ferramenta *Collector Manager*, disponível no menu *Welding*. Aí é permitida a edição e visualização do tipo de entidade seleccionada para cada grupo, Figura 107.

4.1.4.2 Visual Weld

Estando o ficheiro guardado após os passos anteriormente referidos, inicia-se o *Visual Weld* que se encontra juntamente com outras aplicações, no ficheiro *Visual Environment 9.5*.

Após elaboração da geometria, da malha de elementos finitos e dos grupos, é necessário abrir o ficheiro gerado em *Visual Mesh* no software *Visual Weld*. Este software proporciona a edição e criação de grupos, não permitindo alterar quer a geometria criada quer a malha de elementos finitos.

O primeiro passo a efectuar neste ambiente, é a criação da área de transferência de calor entre a peça e o exterior. Está disponível no menu *Tools – Generate Skin from 2D*, Figura 108.

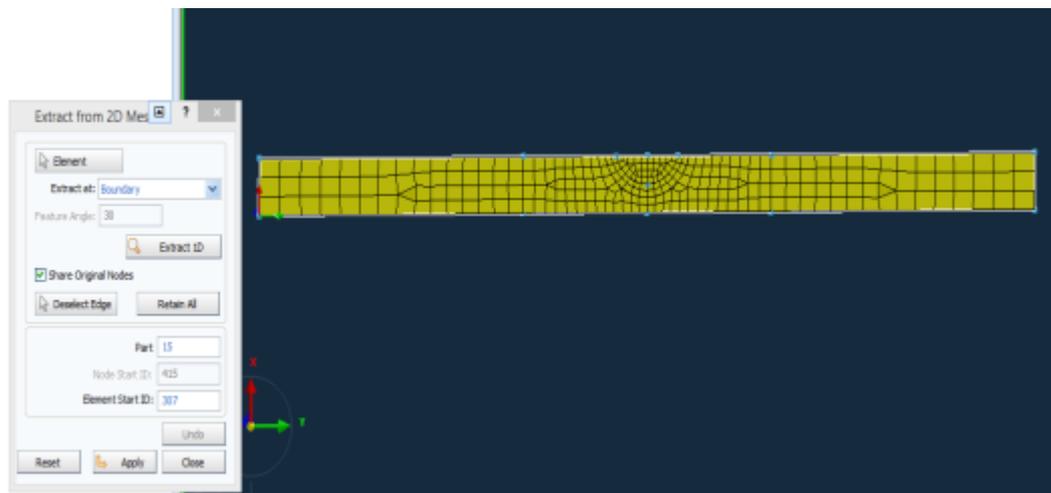


Figura 108 - Geração de área de transferência de calor por convecção

A totalidade dos elementos é escolhida, ficando as fronteiras seleccionadas após efectuar *Extract ID* seguido de *Apply*. A identificação da parte poderá ser alterada no campo *Part ID*.

Na realidade, a área de troca de calor com o exterior não será toda a fronteira da placa. Graças às diversas condições de apoio aquando do processo de soldadura, a dissipação de calor não será uniforme, faltando contabilizar a transferência de calor por condução que existe na realidade. Contudo, para uma solução simplificada como procura ser este caso de estudo, esses pormenores não serão relevantes.

Igualmente no *Visual Weld* será definida a trajectória de soldadura. Para tal a ferramenta encontra-se localizada em *Welding – Create Trajectory*. É dado a escolher a linha de soldadura e a linha de referência. A primeira será a meio da peça e a segunda na fronteira entre o cordão de soldadura e a zona de refinamento circundante. Ao clicar em *Preview* é dada uma pré-visualização do caminho de soldadura. Ao confirmar (*Apply*) são geradas novas partes e grupos correspondentes às linhas de soldadura e suas referências, Figura 109.

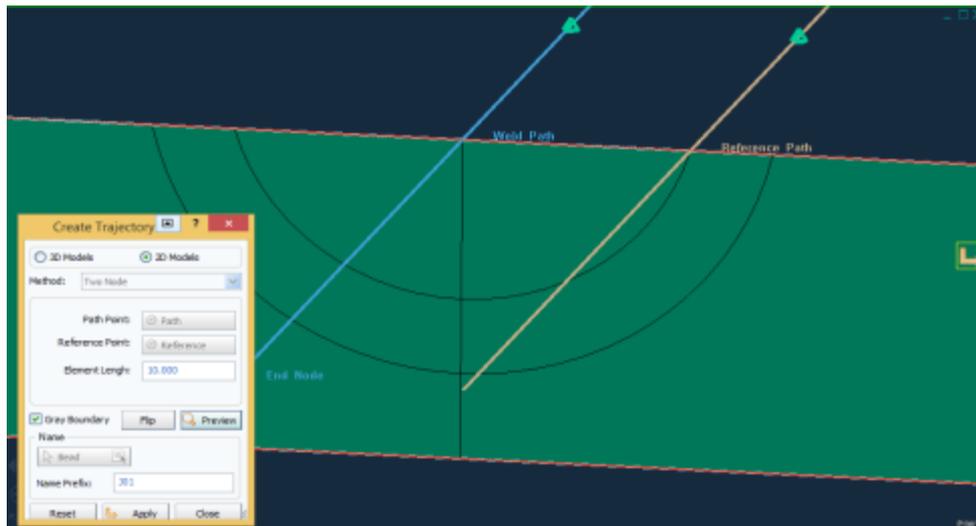


Figura 109 - Trajetória de soldadura

As propriedades de soldadura são atribuídas no campo *Welding – Welding Advisor*. Aí estará um guia com nove passos para formulação do problema.

O primeiro passo trata da definição do projecto. Atribuição de nome, pasta para repositório de informação, legendas, etc., Figura 110.

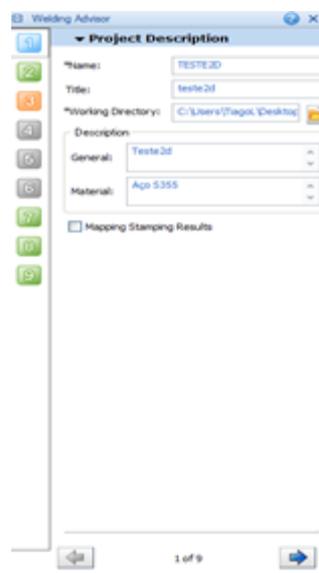


Figura 110 - Assistente de soldadura, descrição do projecto

No segundo passo escolhe-se o tipo de parâmetros globais. Neste caso será uma secção de corte 2D, Figura 111.



Figura 111 - Assistente de soldadura, parâmetros globais

A definição das propriedades do material é feita no terceiro passo. Como neste caso de estudo não é considerada adição de material, em *Components – Component* são seleccionados os grupos de elementos 2D criados para a atribuição de propriedades de material. Depois da sua selecção, é escolhido o material e finalizado em *Add*. O processo é repetido para as duas metades da peça, Figura 112.

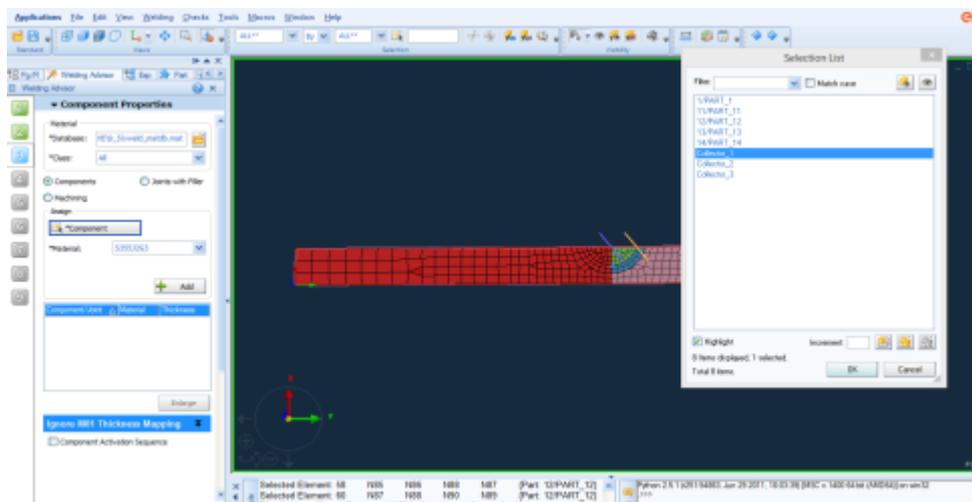


Figura 112 - Assistente de soldadura, atribuição de propriedades do material

Na etapa 4, Figura 114, Figura 115 e Figura 113 é atribuído o processo de soldadura. Esta etapa contém 3 janelas, sendo a primeira da definição do sistema de unidades e dimensões, e referências de soldadura. Na segunda janela definem-se os parâmetros e geometria da mesma ao passo que na terceira se alteram as propriedades energéticas da mesma.

O tipo de soldadura será arco-eléctrico, sendo realizado a uma velocidade constante de 8 mm/s, tendo o feixe de soldadura (duplo elipsóide) um comprimento de 8 mm, largura de 4

mm e penetração de 1,5 mm. Considerou-se uma fonte de energia por unidade de comprimento de 280 J/mm, e uma eficácia do processo de 70%.

No campo *Advanced*, Figura 113, o parâmetro *User Length Step* permite aumentar o número de *frames* por segundo da simulação. Caso de pretenda um maior detalhe temporal na zona da elaboração do cordão de soldadura, deve-se introduzir um valor inferior a 1 nesse campo.



Figura 113 - Assistente de soldadura, definição de parâmetros de soldadura #1

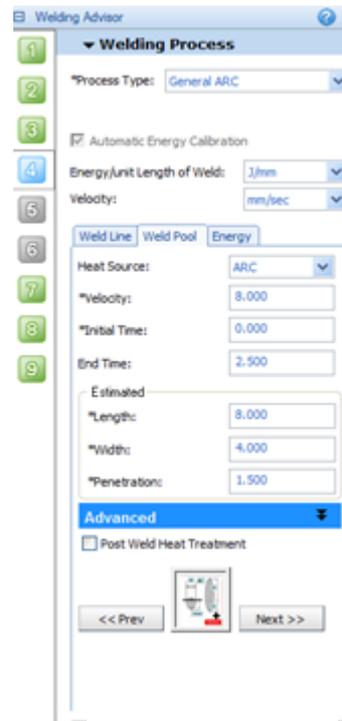


Figura 114 - Assistente de soldadura, definição processo de soldadura #2

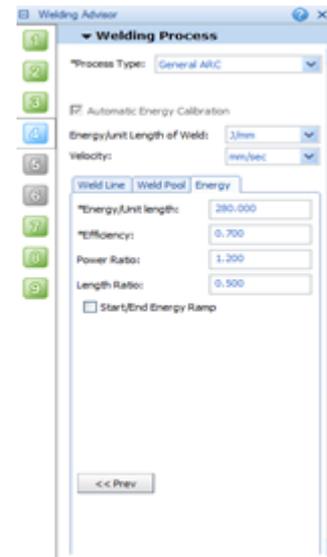


Figura 115 - Assistente de soldadura, definição de parâmetros de soldadura #3

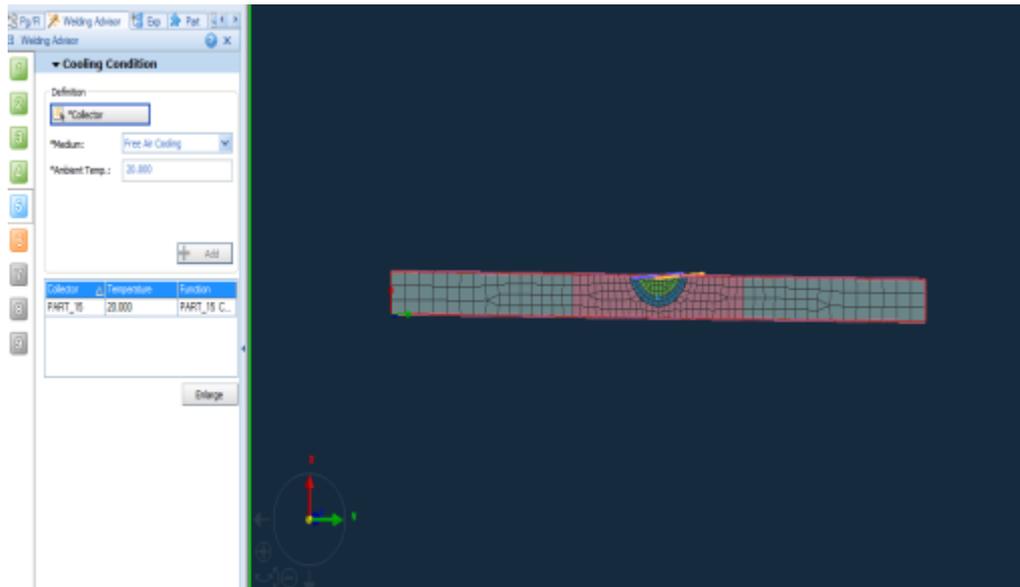


Figura 116 - Assistente de soldadura, atribuição de área de transferência de calor

As condições de arrefecimento são atribuídas na etapa 5, sendo para tal escolhida a área de transferência de calor e uma temperatura do ar exterior de 20°C, Figura 116.

A etapa 6, Figura 117, consiste na atribuição de condições de fixação da peça. Dos nós dos vértices inferiores da peça, cada um é escolhido individualmente e adicionado como sendo um apoio rígido em todas as direcções. No campo *Clamping Condition*, os grupos entretanto seleccionados como pertencentes aos nós de fixação, são aqui activos e escolhido o seu tempo de fixação e ordem. Foi escolhido um tempo de fixação de 60 segundos e uma fixação simultânea dos dois nós em causa (condição de fixação 1, Tabela 19). Num dos nós a fixação é total, sendo no outro apenas restringido o movimento em X.

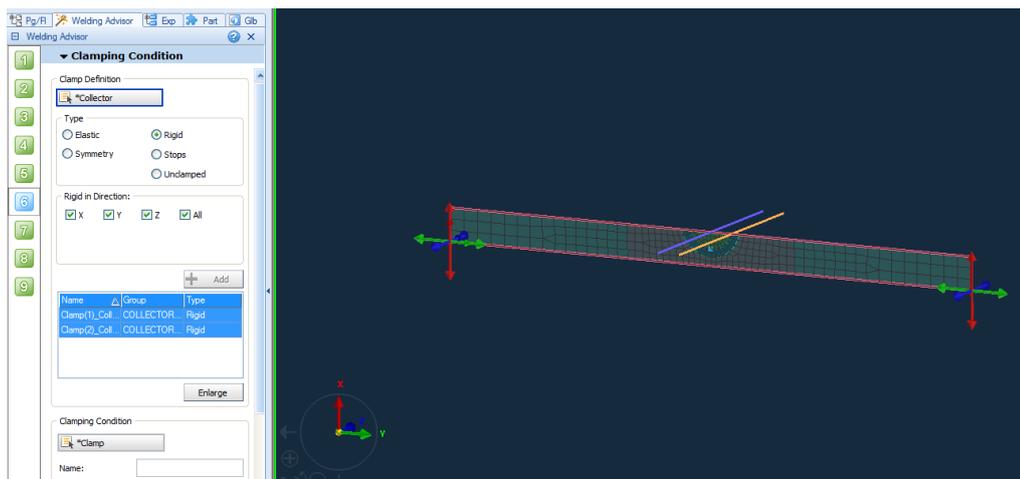


Figura 117- Assistente de soldadura, atribuição das condições de fixação

As etapas 7 e 8, *Loads and Deformations* e *Contact Definition* respectivamente, não serão abordadas neste caso de estudo pois não haverá forças externas a actuar na peça nem contacto com outras peças. Contudo, na etapa *Loads and Deformations*, são passíveis de atribuição campos referentes a cargas, deslocamentos, deformações e pressões. Na etapa *Contact Definition* definem-se os contactos e as trajetórias do mesmo. Podem ser escolhidas relações *Node to Node* ou *Node to Surface*.

Na última etapa definem-se os parâmetros de soldadura, Figura 118. É necessário activar a opção *User-defined solution parameters – Clamping*, se usadas condições de fixação.

Os ficheiros resultantes do pré-processamento serão gerados ao ser pressionado o botão *Generate Input Data*, sendo gravados no directório definido na etapa 1.



Figura 118 - Assistente de soldadura, parâmetros de processamento

4.1.3 Processamento do modelo

Os ficheiros resultantes do *Welding Advisor* são obtidos através do botão *Generate Input Data*. O processamento desses ficheiros é feito através da ferramenta *Welding - Computation Manager*. É importante ter em conta o tipo de processador disponível no computador que fará o processamento, pois a incorrecta escolha gerará erros durante o processamento.

Uma opção de interesse para soluções de engenharia será a ativação do campo *Hardness Computation*, Figura 118, atribuindo assim ao *software* a tarefa de fazer o processamento da dureza do material ao longo do processo. Este parâmetro não fará parte do caso de estudo. De realçar a morosidade deste processo e o conseqüente aumento do custo para as empresas.

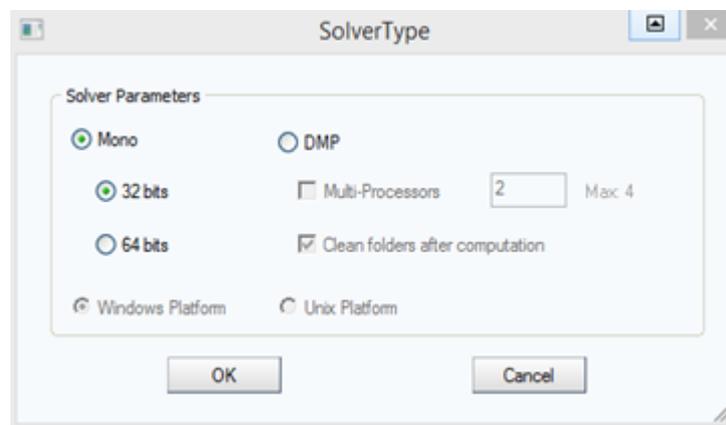


Figura 119 - Opções de processamento

Na ferramenta *Computation Manager* cada etapa será abordada separadamente. No caso de estudo em análise apenas foi definida uma única etapa, com a duração de 60 segundos. É possível escolher o tipo de análise a fazer (termo-metalúrgica e/ou mecânica). Ao longo do processamento, três cores diferentes indicarão o estado do mesmo:

Após gerados os ficheiros necessários para o processamento, na consola do *software* aparecerá um ficheiro de extensão *CHK.LOG* que indicará se existirão erros na elaboração do modelo.

- Azul: processamento a decorrer.
- Cor de laranja: erros no processamento.
- Verde: processamento finalizado com sucesso, Figura 120.

O processamento poderá ser feito directamente no *Visual Weld* através do botão *Compute*, ou então em *Batch Mode*, Figura 121, podendo desta forma o processamento ser realizado com o *software* encerrado. Do primeiro modo, há o inconveniente de não ser possível realizar quaisquer outras operações no *Visual Environment*, dado que o *software* será dedicado única e exclusivamente ao processamento da solução.

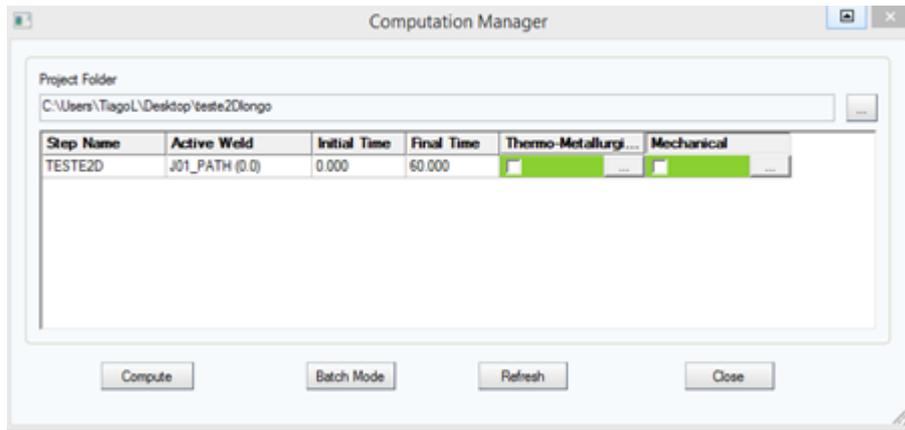


Figura 120 - Processamento finalizado com sucesso

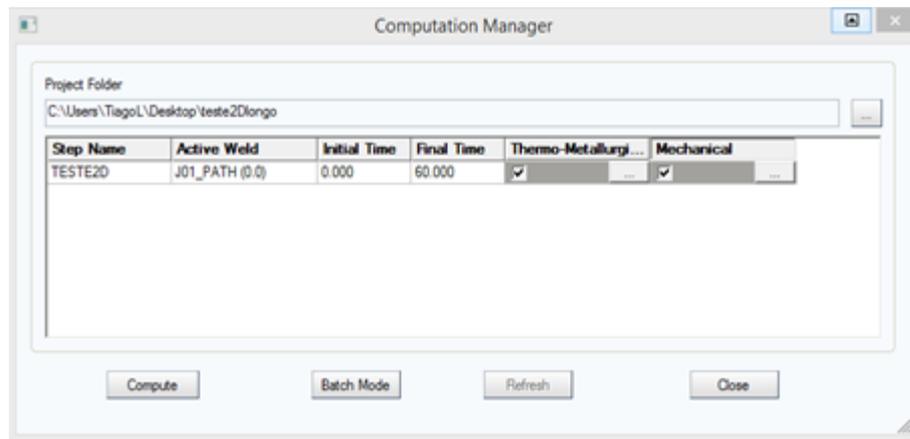


Figura 121 - Escolha do processamento a realizar

4.1.4 Pós Processamento. Visual Viewer / Resultados

O processamento em Sysworld através da ferramenta *Computation Manager* integrante do *Visual Weld*, origina vários ficheiros que se localizarão no directório definido a quando da 1ª etapa do *Welding Advisor*. Desses vários ficheiros, os relativos aos resultados estarão contidos na pasta *03_RESU*. Aí estarão contidos vários ficheiros, sendo os de interesse os de extensão *.fdb*. Desses ficheiros constarão dois tipos: contendo *1000* ou *2000* no seu nome. O primeiro caso será relativo a resultados termo-metalúrgicos e o segundo será relativo a resultados da análise mecânica.

4.1.4.1 Funcionalidades principais

O *Visual Viewer* está provido de ferramentas que possibilitam a visualização das variações dos fenómenos ocorridos.

A definição dos parâmetros dos resultados obtidos é feita no menu *Results* na opção *Contour*. Aí é escolhido o tipo de análise a efectuar segundo o permitido pelo ficheiro seleccionado. No caso de estudo serão abordados os campos mais básicos para proporcionar uma primeira análise de resultados.

Uma funcionalidade básica que será útil na análise de resultados é o espectro *Spectrum Control*, *Figura 125*. Esta visa limitar o espectro de cores da simulação aos valores pretendidos, podendo-se ajustar o número de níveis do mesmo.

A ferramenta que permite controlar as variações temporais é o *Animation*, *Figura 122* e *Figura 123*.



Figura 122 - Barra de animação

Aí é possível correr a simulação, não sendo os intervalos de tempo constantes. Estes variam consoante o interesse dos fenómenos apresentados. O campo *Animation Control*, possibilita a visualização no estado temporal determinado, bem como atribuir factores de ampliação aos resultados visualizados, *Figura 123*.



Figura 123 - Menu animação

De referir ainda três opções úteis que se prendem com a recolha de informação. De forma a recolher imagens e vídeos, utiliza-se a ferramenta *File – Save Image/Movie/Report*. Para gerar gráficos utiliza-se a ferramenta *File – Import and Plot* e para gerar secções de corte utiliza-se *Results – Section Cut*.

4.1.4.2 Análise térmica

No ficheiro com extensão *1000.fdb*, está disponível o resultado do processamento do modelo criado. O comando *Results – Contour* permite a selecção dos dados disponíveis neste ficheiro, estando os resultados da análise térmica presentes em *Node – Temperature*, Figura 124.

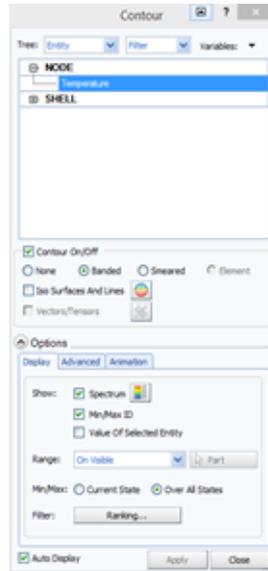


Figura 124 - Menu Contour

No sub-menu *Options – Spectrum*, altera-se o perfil de temperaturas de acordo com o pretendido a analisar. Estando em busca da região fundida, este perfil de temperaturas estará limitado portanto à temperatura de fusão do aço S355J2G3, que se situará nos 1400°C. O número de níveis *#Levels* desse espectro será de 11, Figura 125.



Figura 125 - Espectro de resultados

Findada a definição dos dados para análise do pós-processamento, no momento de passagem do arco-eléctrico pela secção de corte, obtém-se os valores para a maior dimensão da região fundida da peça, Figura 126.

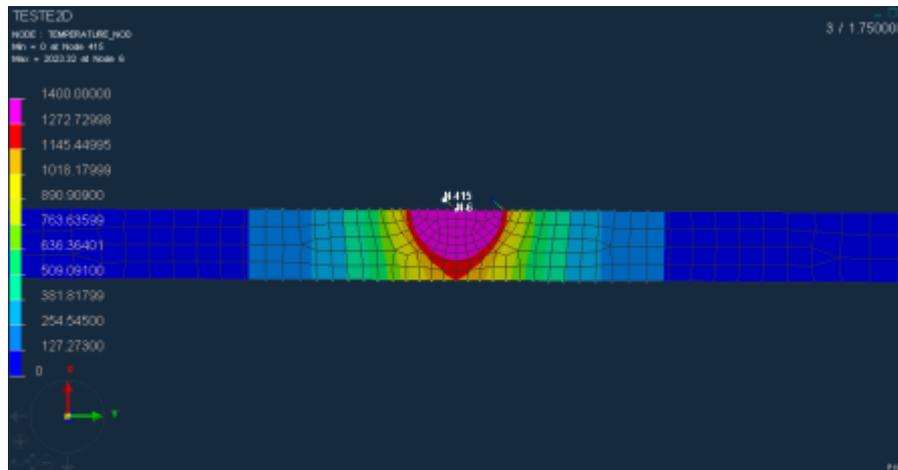


Figura 126 - Campo de temperaturas para o instante máximo de penetração do cordão

De forma a obter-se o perfil de temperaturas ao longo de uma direcção da peça, utiliza-se a opção *Tools – Define Profile Path*, escolhendo o tipo de elemento e criando um grupo para o mesmo, Figura 128 e Figura 127.

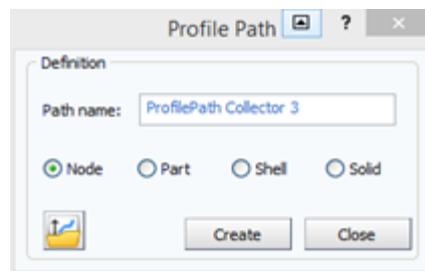


Figura 127 - Definição de caminho de perfil

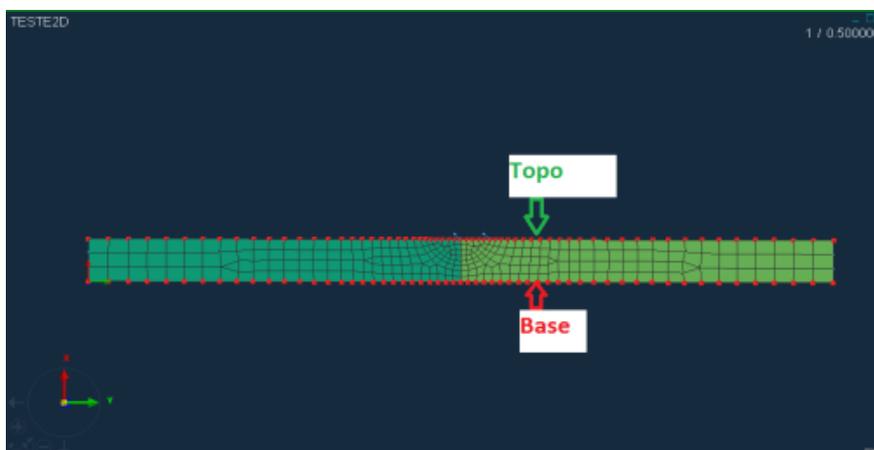


Figura 128 - Caminhos criados para extracção de resultados

De seguida em *File – Import and Plot*, no menu de escolha *Entity/Ordinate – Entity*, escolher *Defined Path* e de seguida o grupo anteriormente criado. Assim podem-se definir grandezas num determinado instante de tempo em função das dimensões escolhidas, Figura 129.

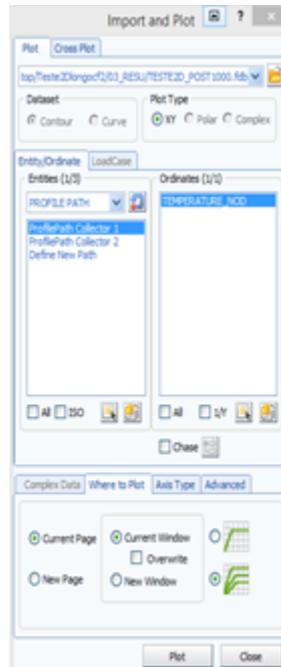


Figura 129 - Geração de gráficos

Para o instante 1,75 segundos, o perfil de temperaturas do caso de estudo 2D será o seguinte:

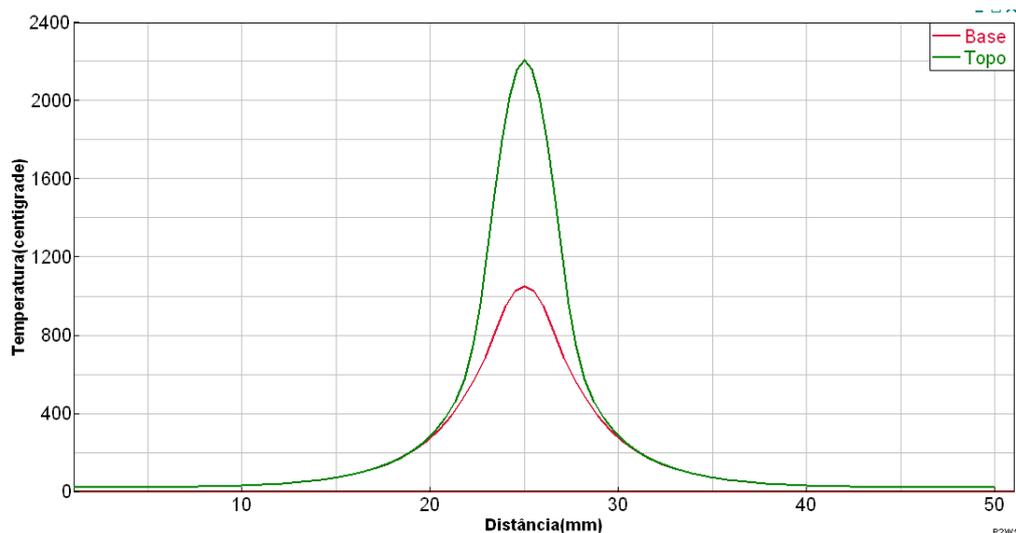


Figura 130 - Perfil de temperaturas para o instante de penetração máximo ao longo da largura da placa

A área fundida ultrapassa a região definida para o cordão de soldadura em profundidade, já que a sua largura se encontra nos 4 mm. Tal evidencia a necessidade de correcção dos parâmetros de soldadura de forma a obter a região pretendida. A correcção será objecto de análise posterior neste capítulo.

Da observação da Figura 130 é notório que o modelo ficou bem implementado já que há uma transição suave do perfil de temperaturas entre a zona do cordão de soldadura e a sua vizinhança mais próxima (Figura 131 e Figura 132). Caso não existisse união entre os elementos, a vizinhança do cordão de soldadura estaria aproximadamente à temperatura ambiente.

O campo térmico é independente das condições de fixação, sendo esta representação válida para os três casos de fixação em estudo.

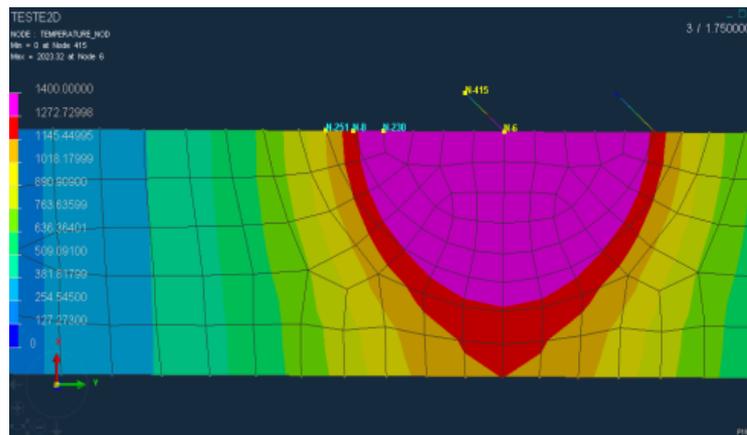


Figura 131 - Nós seleccionados para estudar as variações de temperatura em função do tempo de soldadura

A temperatura máxima é atingida aproximadamente ao segundo 1,75, pelo que o arrefecimento seguirá uma curva exponencial negativa. No final do tempo do teste (60 segundos), o perfil de temperaturas estará estabilizado à temperatura ambiente, Figura 132.

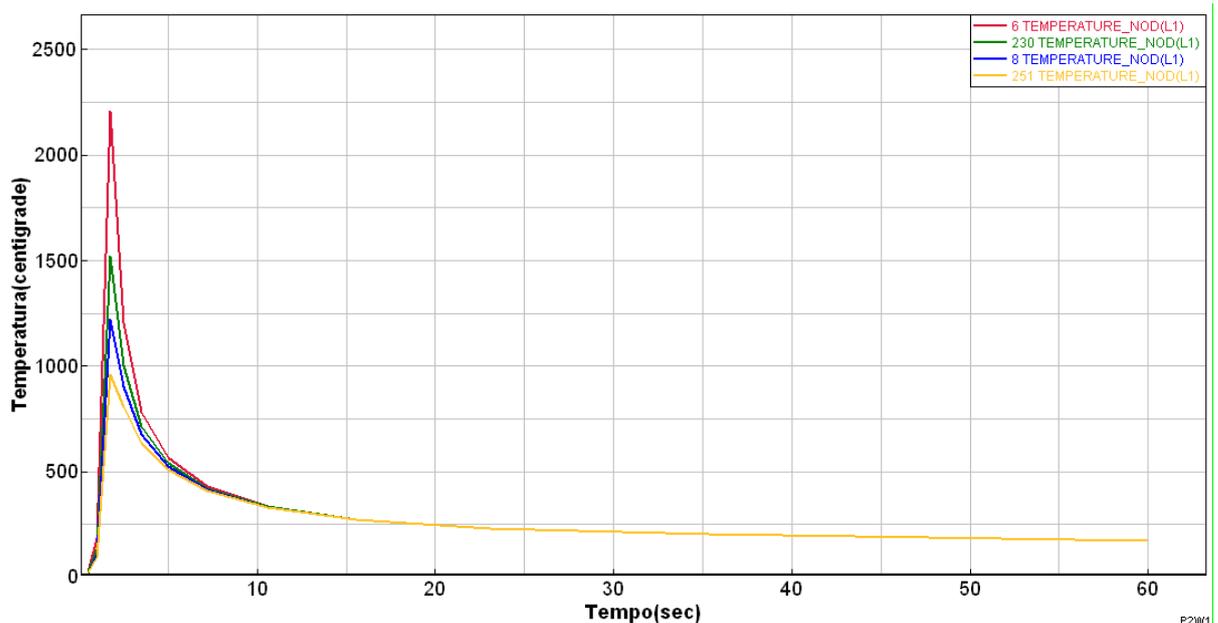


Figura 132 - Variação temporal das temperaturas para os nós seleccionados

Calibração do cordão de soldadura

Muito dificilmente os parâmetros definidos no processo de soldadura em *Visual Weld* corresponderão à dimensão pretendida para o mesmo. Para isso contribui desde o desconhecimento da entrega energética da operação, à sua eficiência, passando pelas alterações de velocidade e acelerações existentes na realidade. É necessário ter bem presente qual a temperatura de fusão do material a trabalhar e as dimensões do cordão de soldadura. Limitando o espectro do perfil de temperaturas no *software* e visualizando perfeitamente o que é área fundida ou zona termicamente afectada, por um processo iterativo manual é possível controlar as dimensões do cordão.

A análise do caso de estudo realizada a partir dos primeiros valores admitidos para os parâmetros de soldadura, apresenta um excesso de penetração na raiz do cordão (0,63 mm), que se estende para lá da zona definida na malha de elementos finitos, Figura 133.

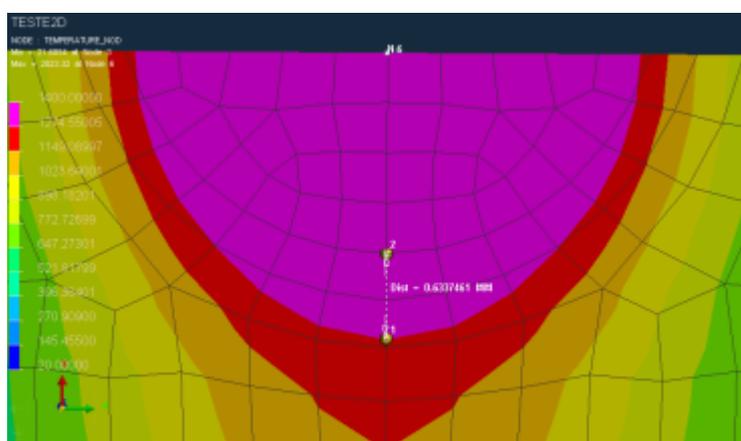


Figura 133 - Cordão de soldadura máximo para as condições definidas inicialmente

Valores iniciais:

- Energia por unidade de comprimento: 280 J/mm.
- Eficiência do processo: 70%
- Penetração do cordão de soldadura: 1,5 mm

De forma a diminuir este excesso, é possível encontrar soluções que passam pela alteração da eficiência do projecto, valor da energia por unidade de comprimento e diminuição do valor da penetração do cordão (para valores mais baixos do que o pretendido na realidade).

Iteração #1

- Energia por unidade de comprimento: 280 J/mm
- Eficiência: 60%

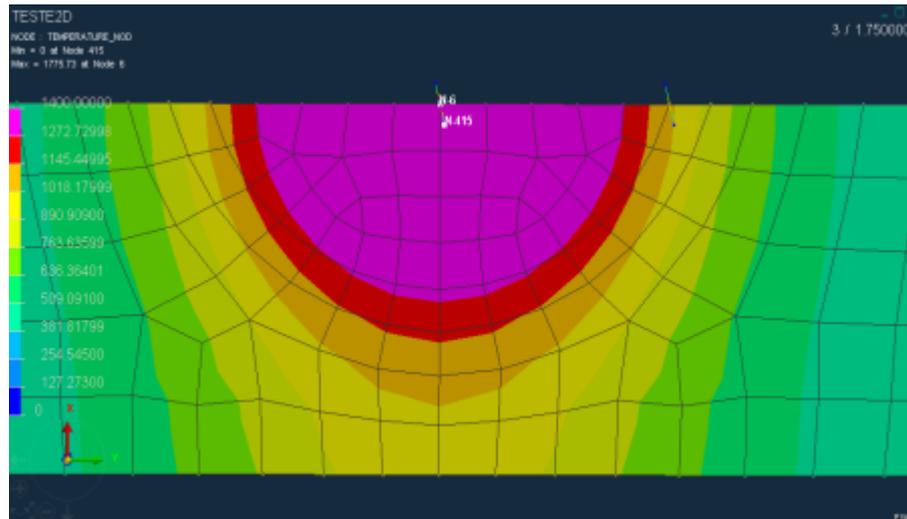


Figura 134 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após efectuada a primeira tentativa de correcção

Diminuindo a eficiência do processo de soldadura há igualmente uma diminuição da largura do cordão, o que não é pretendido.

Iteração #2

- Energia por unidade de comprimento: 270 J/mm
- Eficiência: 70%

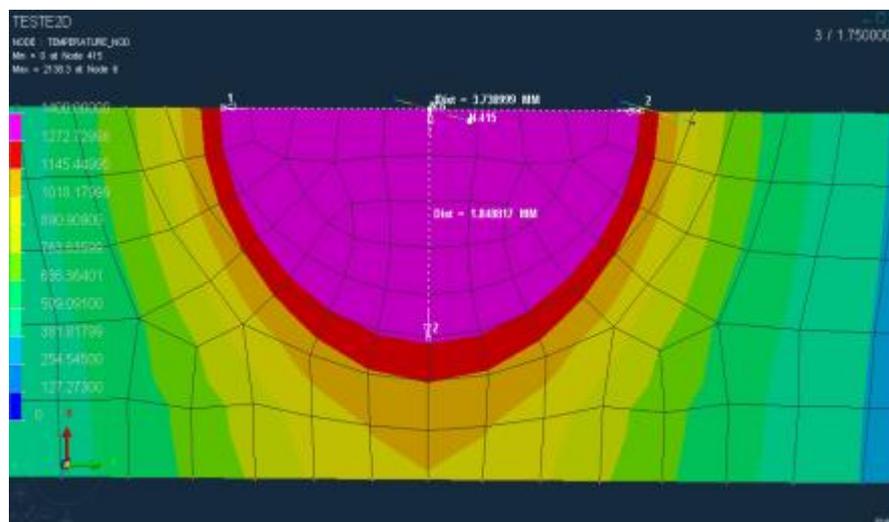


Figura 135 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após realizada a 2ª tentativa de correcção

A diminuição da energia por unidade de comprimento reduz a profundidade do cordão e mantém a largura do mesmo em valores aceitáveis. A reposição do rendimento do processo a 70% foi um retrocesso para ter como comparação os valores iniciais.

Iteração #3

- Energia por unidade de comprimento: 270 J/mm
- Eficiência: 73%

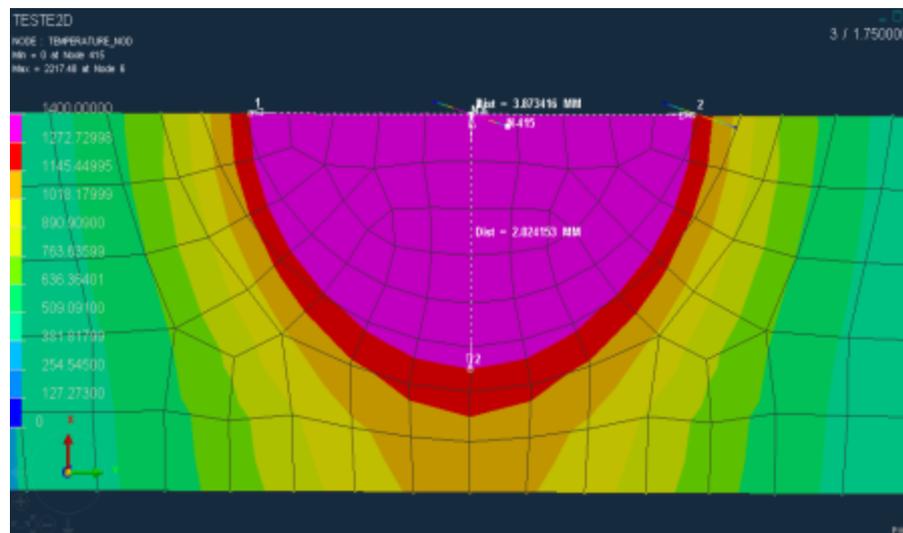


Figura 136 - Dimensão máxima do cordão de soldadura após 3ª iteração

Após acertado o valor da largura da zona fundida, procede-se à diminuição do valor da profundidade do cordão para valores abaixo do geometricamente real.

Iteração #4

- Energia por unidade de comprimento: 270 J/mm
- Eficiência: 73%
- Penetração: 0,3 mm

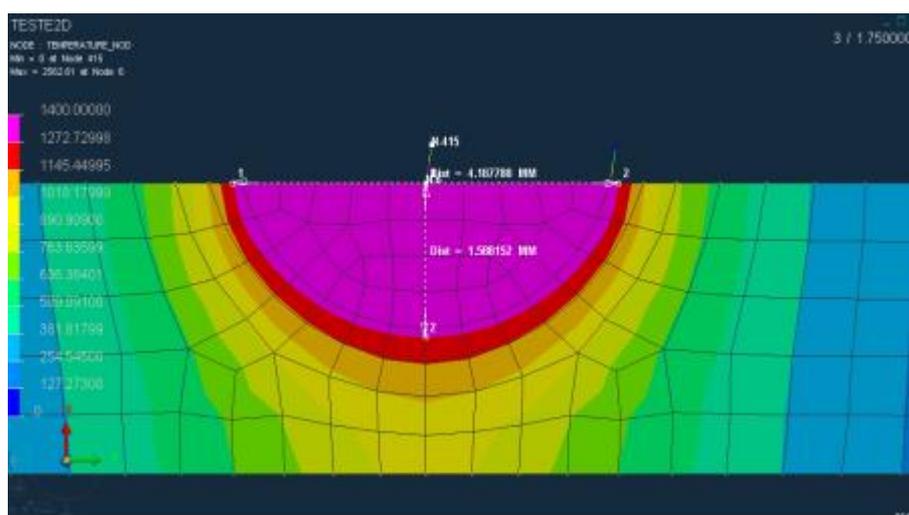


Figura 137 - Dimensão máxima do cordão de soldadura corrigido

Obtém-se assim a correcção para o cordão de soldadura, apresentando dimensões muito próximas às pretendidas inicialmente.

Para o modelo 2D calibrado, o campo térmico no topo (curva a verde) e na base (curva a vermelho) é o seguinte:

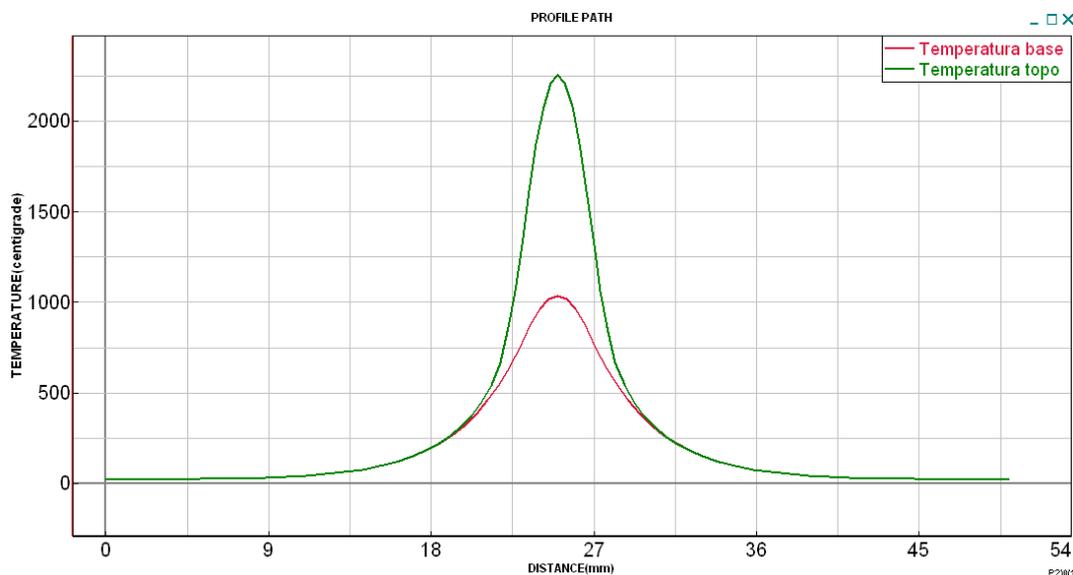


Figura 138 - Campo térmico ao longo da largura da placa para instante de penetração máximo do cordão de soldadura. Modelo calibrado

Comparativamente com o campo térmico obtido numa primeira aproximação, Figura 130, feita a calibração do modelo as temperaturas máximas na base serão inferiores (1000°C, face aos cerca de 1050°C obtidos numa primeira análise). Já no topo da chapa as temperaturas são semelhantes (2200°C). Conclui-se daqui que há uma maior variação de temperaturas entre o topo e a base da chapa no caso do modelo calibrado, tal indica a presença de uma maior incidência do calor do processo de soldadura sobre o topo da chapa (modelo calibrado), sendo o arrefecimento mais acentuado ao longo da espessura da chapa. Este efeito é devido às alterações da geometria do duplo-elipsóide da fonte de calor.

4.1.4.3 Análise metalúrgica

Do ficheiro *POST1000.fdb* é possível extrair os resultados das proporções de fase. Utiliza-se o mesmo procedimento da análise térmica para escolher o tipo de análise pretendida, escolhendo neste caso *Solid - Phase Proportions*.

Nas opções da ferramenta *Contour* aparecerá agora a opção do tipo de fase a visualizar, Figura 139.

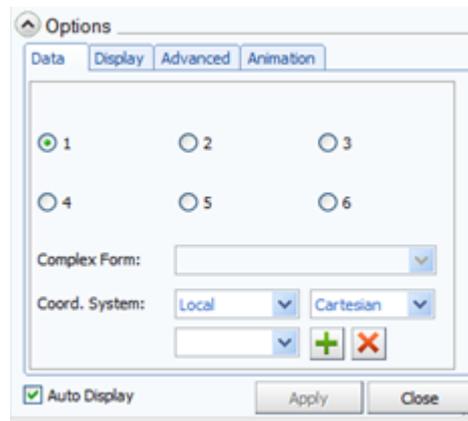


Figura 139 - Escolha de fase química

Os números de 1 a 6, representam as fases disponíveis no material em questão. Pela consulta do ficheiro *vweld_matdb* disponível no directório do caso de estudo - contem a base de dados dos materiais utilizados no *Sysweld* - pesquisando o material S355J2G3, as fases são as seguintes:

- 1 – Ferrite/ Perlite e material inicial
- 2 – Material de adição (não existente)
- 3 – Martensite
- 4 – Bainite
- 5 – Martensite temperada
- 6 – Austenite

Para cada análise é importante alterar o espectro para o situar entre 0 e 1, já que se estão a analisar proporções. As figuras da Tabela 22 são relativas ao instante final da soldadura.

Tabela 22 - Campo de fase química para o instante final de soldadura

Fase	Distribuição de fase	Fase	Distribuição de fase
1 – Ferrite/ Perlite	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_1 Min = 0.0000227 at Ele 190 Max = 1 at Ele 203</p>	4 - Bainite	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_4 Min = 0 at Ele 203 Max = 0.57043 at Ele 57</p>
2 – Material de adição.	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_2 Min = 0 at Ele 170 Max = 0 at Ele 170</p>	5 Martensite temperada	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_5 Min = 0 at Ele 170 Max = 0 at Ele 170</p>
3 Martensite	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_3 Min = 0 at Ele 203 Max = 0.42307 at Ele 189</p>	6 Austenite	<p>TESTE2D SHELL : PHASE_PROPORTIONS_ELE_6 Min = 0 at Ele 203 Max = 0.99949 at Ele 189</p>

No *Visual Viewer* a extracção do gráfico da variação das proporções de fase em ordem ao tempo deverá ser feita na opção *Shell*, sendo aí escolhidos os elementos 2D desejados para análise, Figura 141 e Figura 140.



Figura 140 - Escolha de fase química para elaboração de gráficos

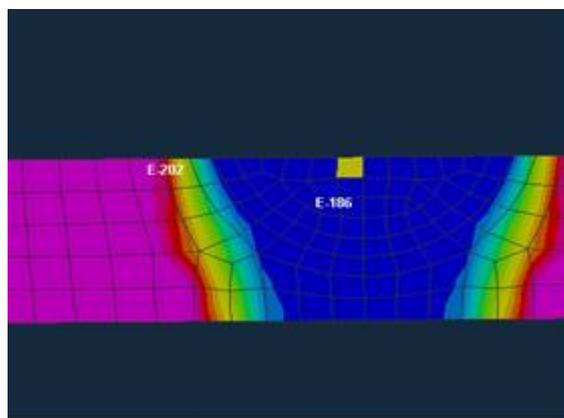


Figura 141 - Elemento 2D do cordão de soldadura escolhido para análise química

Da legenda da Figura 142, o mapa de cores apresentado refere ao seguinte:

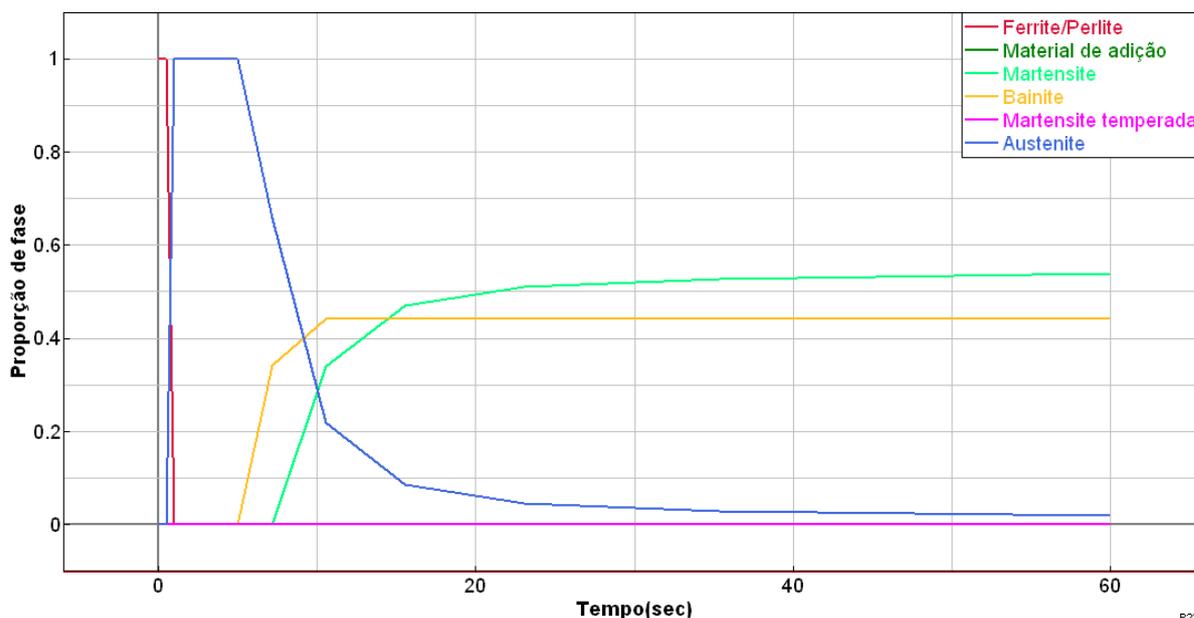


Figura 142 - Variação das fases químicas ao longo do processo de soldadura

- Vermelho: ferrite/ perlite e material inicial;
- Verde escuro: material de adição (não visível já que se encontra na linha de abcissa nula);
- Verde claro: martensite;
- Amarelo: bainite;
- Rosa: martensite temperada;
- Azul: austenite;

Na escolha do elemento 2D representado na *Figura 141*, foi tida em conta de forma a apresentar a variação das proporções de fase numa zona central do cordão de soldadura. Tal análise não poderá ser aplicada a toda a peça, sendo contudo possível esclarecer de forma simplista os fenómenos que ocorrerão na zona de actuação da soldadura.

Na primeira figura da *Tabela 22* é visível uma alteração das propriedades metalúrgicas do material resultante do calor da soldadura. Essa alteração propaga-se para além da região fundida, alastrando-se até à raiz do dente, com uma largura considerável nas costas da chapa. Segundo o gráfico da *Figura 142*, a percentagem inicial de ferrite/perlite diminui rapidamente. Essa diminuição é acompanhada de um aumento brusco da percentagem de austenite, vindo esta a diminuir a sua percentagem progressivamente ao longo do processo.

A figura 2 da *Tabela 22* é meramente indicativa de que não existiu adição de material na soldadura. É comprovado igualmente na *Figura 142*, estando o valor correspondente a essa fase permanentemente a zero (verde escuro).

A figura 3 da *Tabela 22* mostra que a percentagem de martensite era nula inicialmente e no final da soldadura a zona que sofreu alterações referida na figura 1 da *Tabela 22*, contém

proporções elevadas de martensite. Também houve introdução de bainite nessa região como comprova a figura 4 da mesma tabela. No gráfico da Figura 142, é notório que a diminuição da percentagem de austenite se origina no instante de tempo da formação da bainite, sendo depois incrementada com o surgimento da martensite. A austenite não sendo totalmente transformada na peça, representará uma percentagem residual.

Não ocorreu formação de martensite temperada durante o processo, figura 5 da Tabela 22 e Figura 142.

No final do processo, a composição reparte-se em cerca de 55% martensite, 45% bainite e 5% austenite.

Toda a restante porção de material da chapa para além da zona termicamente afectada e do cordão de soldadura não sofreu alterações a nível metalúrgico.

4.1.4.4 Análise de distorções e campo de deslocamentos

Do ficheiro *2000.fdb* é seleccionada a opção *Contour – Node – Displacement*. As tensões residuais estão também disponíveis no mesmo ficheiro, na opção *Shell – Stress Tensor*.

É possível alternar entre estes dois ficheiros abertos no menu *Page* disponível na barra de ferramentas, Figura 143.



Figura 143 - Menu de selecção de página

No *Spectrum Control*, Figura 144, o nível de tensões deve ser limitado à tensão de cedência do material (355MPa para aço S355J2G3) e ajustado o número de níveis do espectro para 11. Todo e qualquer valor acima do referido originará plasticidade na peça.

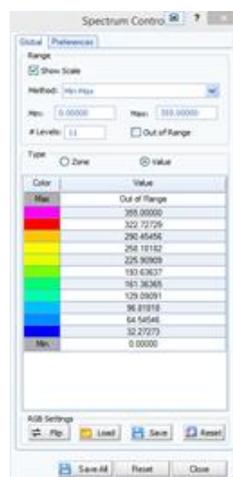
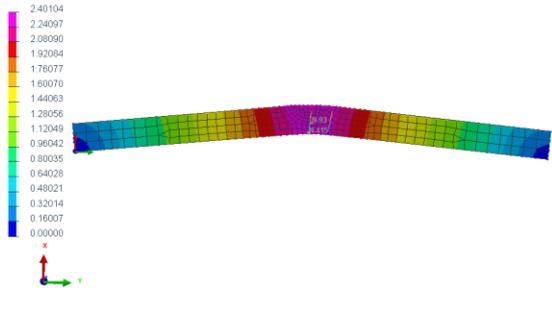
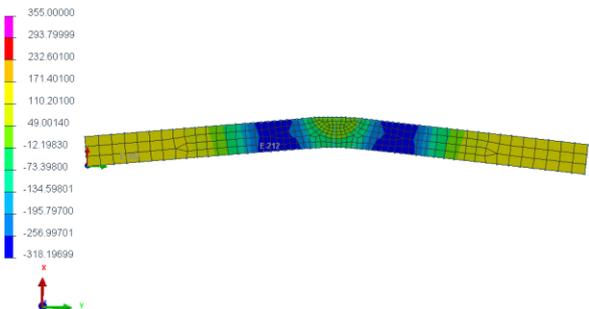
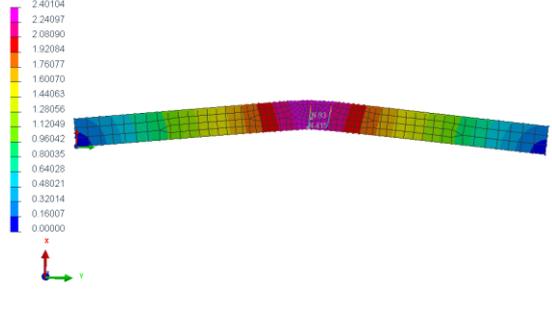
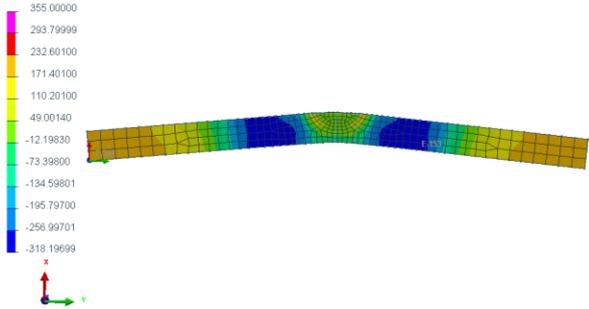
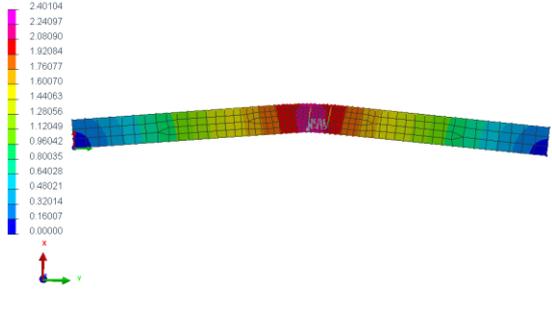
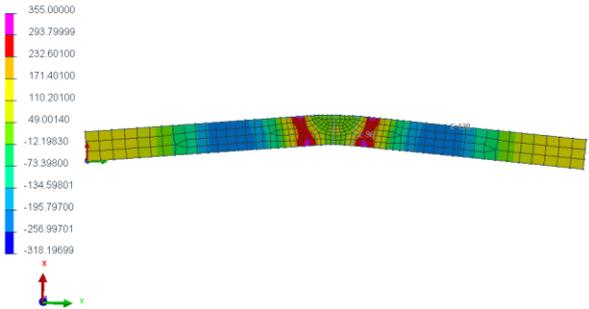


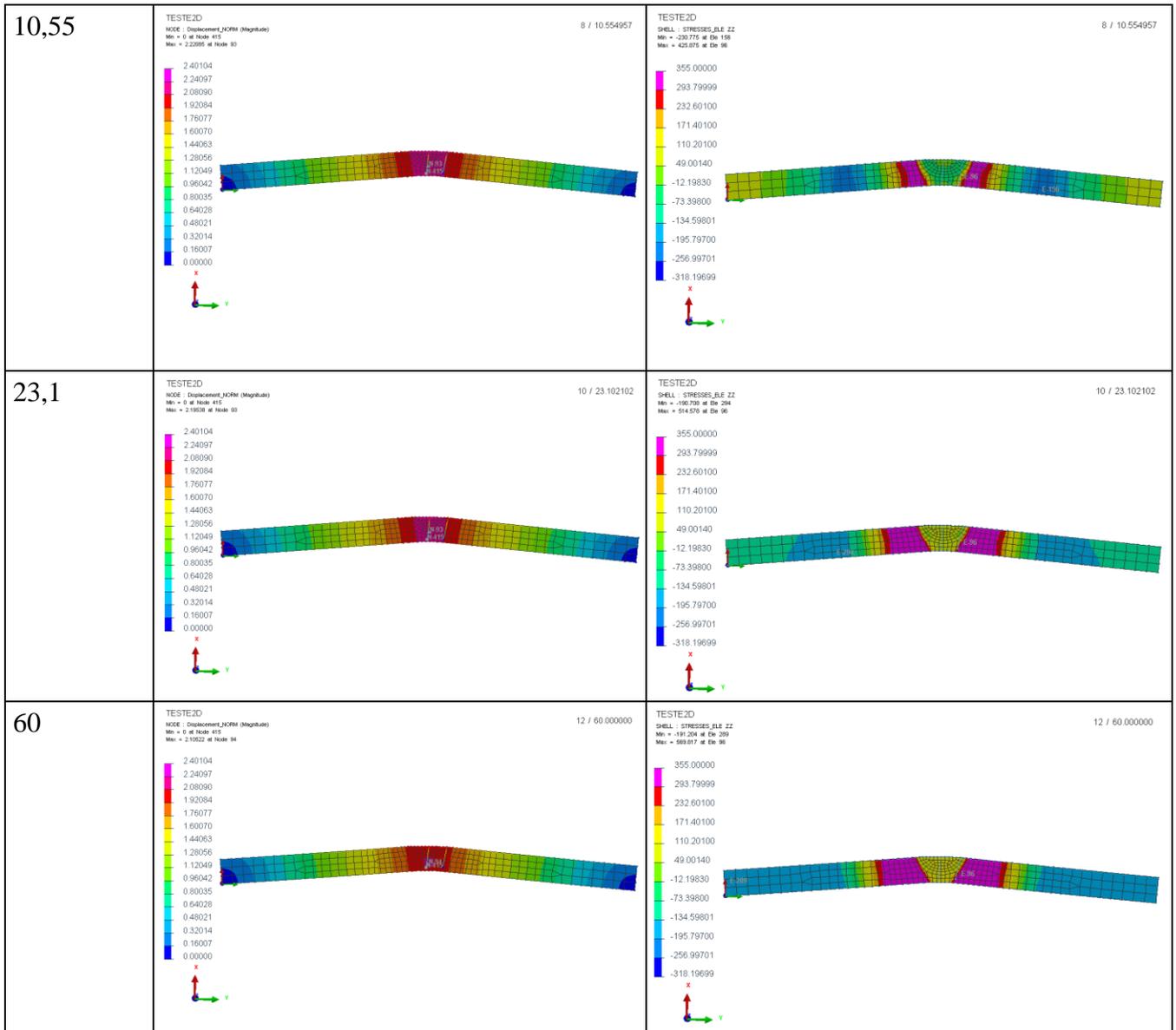
Figura 144 - Espectro de tensões residuais

Devido à diferente quantidade de informação contida em cada um dos ficheiros, os instantes de tempo comuns aos dois ficheiros são apenas quatro (0, 1, 2,5 e 60 segundos), estando a comparação das tensões residuais com as distorções assente nos três últimos intervalos de tempo referidos.

No instante inicial a operação de soldadura não foi realizada, pelo que tanto as tensões residuais como as distorções serão nulas e sem interesse para aqui representadas.

Tabela 23 - Evolução das distorções vs tensões residuais (condição de fixação 1)

Instante de tempo (s)	Distorções	Tensões residuais zz (MPa)
1,75	<p>TESTE2D NCE : Displacement_X(90) (Magnitude) Min = 0 at Node 415 Max = 2.40104 at Node 93</p> <p>3 / 1.750000</p> 	<p>TESTE2D SHELL : STRESSSES_ELE_ZZ Min = -303.933 at Ele 312 Max = 187.336 at Ele 302</p> <p>3 / 1.750000</p> 
2,5	<p>TESTE2D NCE : Displacement_X(90) (Magnitude) Min = 0 at Node 415 Max = 2.36961 at Node 93</p> <p>4 / 2.500000</p> 	<p>TESTE2D SHELL : STRESSSES_ELE_ZZ Min = -288.634 at Ele 133 Max = 239.951 at Ele 304</p> <p>4 / 2.500000</p> 
7,2	<p>TESTE2D NCE : Displacement_X(90) (Magnitude) Min = 0 at Node 415 Max = 2.17252 at Node 94</p> <p>7 / 7.209052</p> 	<p>TESTE2D SHELL : STRESSSES_ELE_ZZ Min = -283.346 at Ele 126 Max = 311.902 at Ele 96</p> <p>7 / 7.209052</p> 



No *Sysweld* o campo de tensões residuais é acompanhado com a distorção da peça, o que justifica neste trabalho a análise destas duas grandezas em simultâneo, Tabela 23.

As tensões residuais de interesse a analisar são segundo a normal ao cordão de soldadura (direcção Z). Além de serem as tensões críticas da peça (como provam os gráficos extraídos das diferentes tensões exibidos), servirão para comparar este estudo com um caso teórico clássico do campo de tensões residuais em soldadura de arco-eléctrico.

Esta abordagem contempla apenas o primeiro caso de fixação, servido apenas para verificar fenómenos do relacionamento entre tensões residuais e deformações resultantes da soldadura.

Durante a passagem da fonte de calor (segundo 1), é originada fusão zona do cordão de soldadura, calor este que irá gerar dilatações no material. Este, ao estar fixo rigidamente pelos vértices inferiores da placa, tende a flectir convexamente. Na região onde ocorre fusão, desenvolvem-se baixas tensões de compressão ao passo que na raiz do cordão e na zona termicamente afectada as tensões residuais de compressão serão de elevado valor. O valor de tensões quase nulas na zona do cordão remete para o seu estado líquido e para a baixa resistência oferecida por este estado às movimentações do material sólido. Para se verificar o

estado de equilíbrio do corpo, as tensões de compressão terão que ser acompanhadas de tensões de tracção, estando essas na periferia da peça.

Já ao segundo 2,5 com o início do processo de solidificação do cordão de soldadura, as deformações atingiram um máximo, indo diminuir até ao arrefecimento final. Porém por volta do segundo 7 devido ao calor latente da mudança de fase (aparecimento da martensite, Figura 142), há um ligeiro incremento da deformação, continuando posteriormente a decrescer acompanhado do arrefecimento da peça (instante de tempo 7,2s a 10,55s). No mesmo intervalo de tempo referido, as tensões de compressão diminuem na raiz do cordão de soldadura, resultado da maior zona de fusão e expandem-se na zona termicamente afectada, resultado da maior dilatação da peça. Na região da fixação, as tensões de tracção aumentam devido à restrição da expansão da peça. Na zona circundante ao cordão de soldadura, geram-se elevadas tensões de tracção.

No instante final (segundo 60), já com o campo de temperaturas estabilizado à temperatura ambiente, como foi dito, as distorções diminuem, o que conduz a um aumento das tensões residuais. Estas passam de compressão na zona termicamente afectada para tracção e de tracção na periferia para compressão. A contracção do material durante o arrefecimento gera esforços de compressão junto à zona de fixação. Por sua vez, a zona do cordão será sujeita à tracção, sendo estas tensões máximas na zona termicamente afectada.

4.1.4.5 Representação gráfica das tensões residuais função da geometria da peça.

De acordo com o que é feito a nível teórico para análise de tensões residuais, foram recolhidos os resultados das mesmas para o instante final do processo de soldadura e agrupados em função do comprimento da placa e da espessura (para tensões segundo xx e yy).

Na Figura 145, estão indicados os caminhos traçados no *software* para determinação das funções. A resultante destas duas curvas será sobreposta de forma gráfica e identificadas as principais diferenças, Tabela 24.

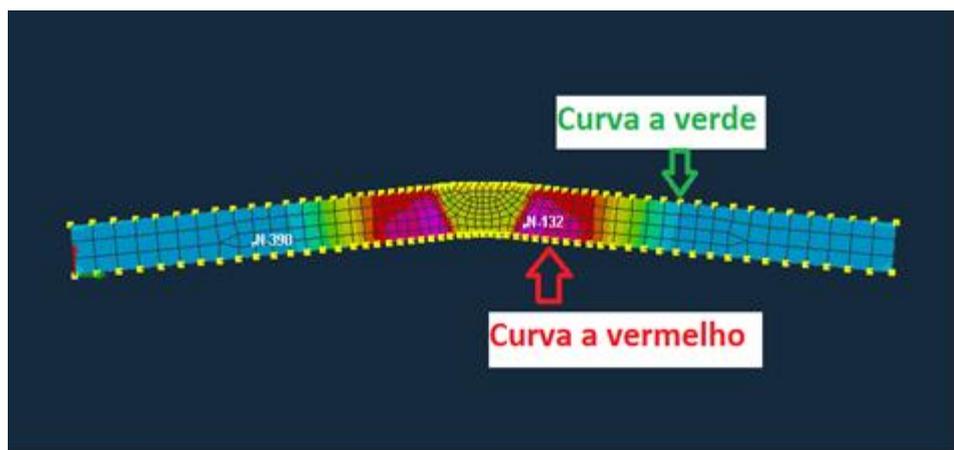


Figura 145 - Caminhos para extracção de resultados e cores representativas nos gráficos

4.1.4.5.1 Tensões segundo zz

Tabela 24- Tensões residuais zz ao longo da largura da peça

Condição de fixação	Distribuição das tensões residuais zz
1	
2	
3	

Da Tabela 24 é possível verificar que a zona de tensões residuais máximas ocorre na zona termicamente afectada. De forma a haver um equilíbrio estático, o volume das tensões de compressão deverá ser igual ao das tensões de tracção, o que não apesar de não ser visível nesta análise (feita apenas a camadas superficiais da peça), demonstra uma distribuição das tensões residuais consoante os modelos obtidos recentemente por via MEF, Figura 54 e Figura 58.

No caso das condições de fixação tipo 1, Tabela 24, há uma maior disparidade entre os valores de tensões residuais na base e no topo. As tensões na base atingem os valores máximos dos 3 tipos de condição de fixação.

Para o segundo caso de fixação ao libertar um nó na direcção transversal da placa, gera-se um equilíbrio entre as tensões residuais no topo e na base, o mesmo acontece para o 3º caso de fixação onde os quatro vértices são limitados em todas as direcções. Neste último caso, as tensões de compressão diminuem perto da zona da fixação.

Nos três casos, a quebra de tensão (ao longo da espessura) na região do cordão de soldadura é menor na superfície comparativamente à base.

4.1.4.5.2 Tensões segundo yy

Seguido a mesma atribuição dos nós para extracção dos resultados, obtém-se para os valores das tensões residuais segundo a direcção perpendicular ao cordão de soldadura yy.

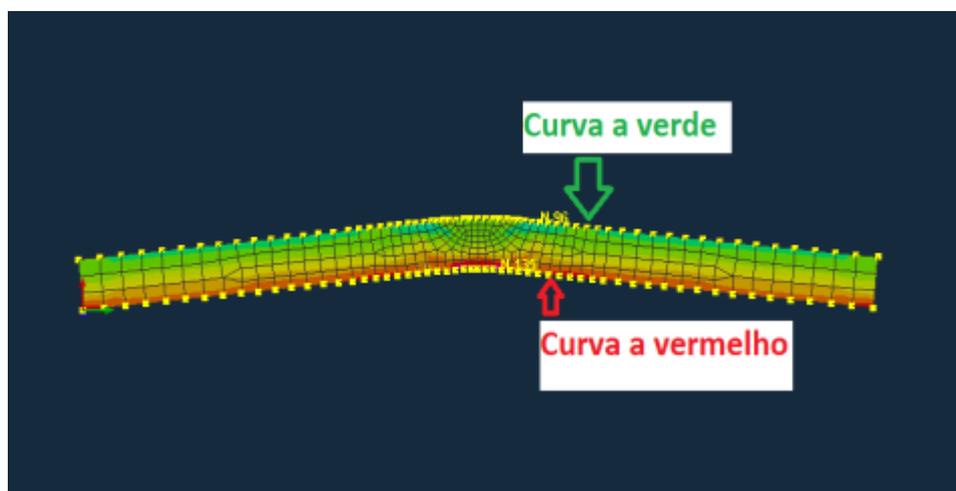
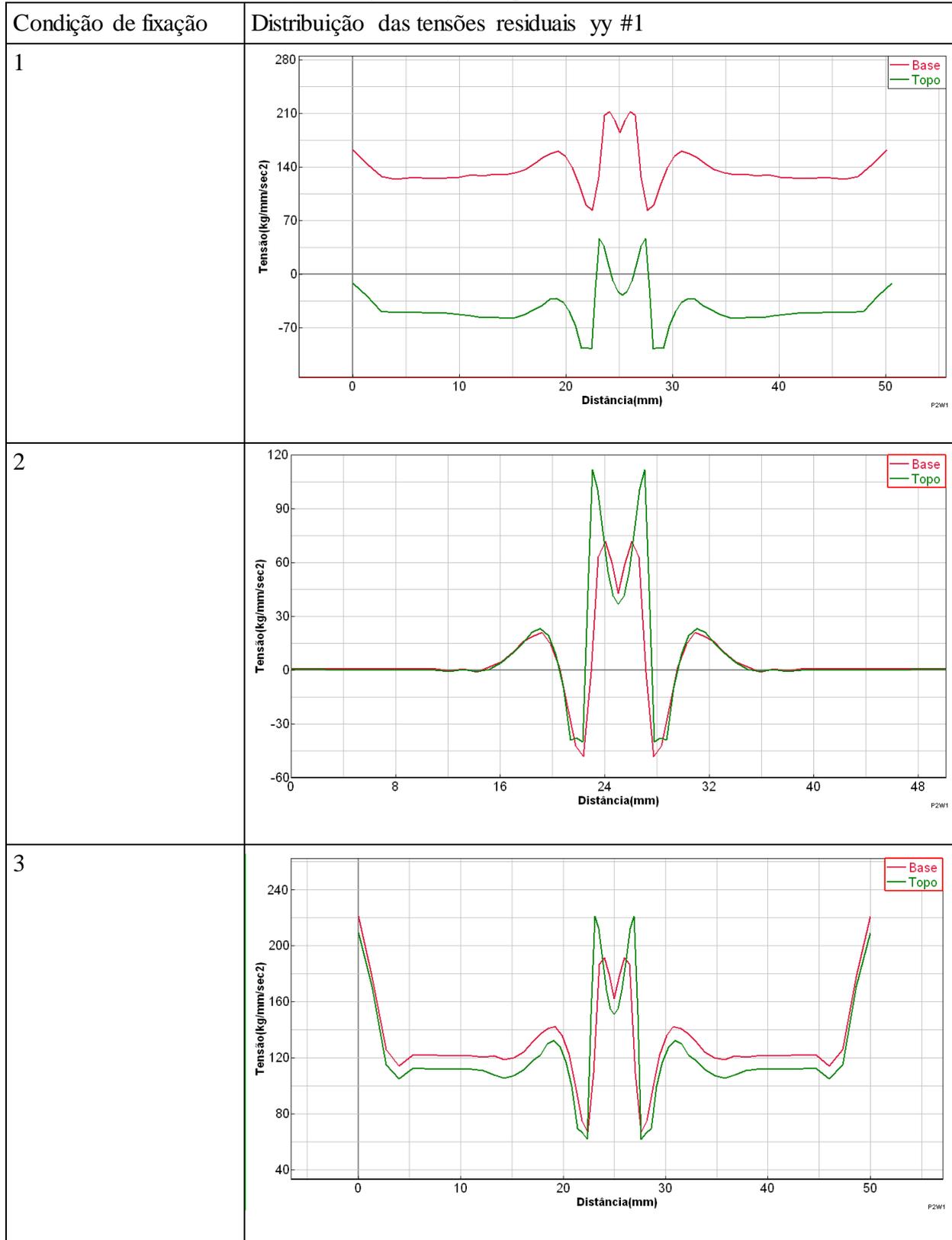


Figura 146 - Caminho escolhido para extracção das tensões residuais yy e respectiva cor das curvas dos gráficos

Tabela 25 - Tensões residuais yy ao longo da largura da placa



As tensões segundo yy são as segundas tensões mais elevadas presentes na peça. São largamente influenciadas pelas condições de fixação, sendo a restrição de movimento segundo Y a grande responsável pelo seu aumento. É evidente no segundo tipo de condição de fixação,

onde o valor máximo para estas tensões ronda os 90 MPa, sendo nos outros dois casos (com restrição de movimento em Y), de cerca de 220 MPa.

O primeiro caso de fixação é esclarecedor do ponto de vista em que as tensões yy na base (representadas a vermelho) são muito maiores do que as do topo, estando portanto a base restrita em Y e o topo livre.

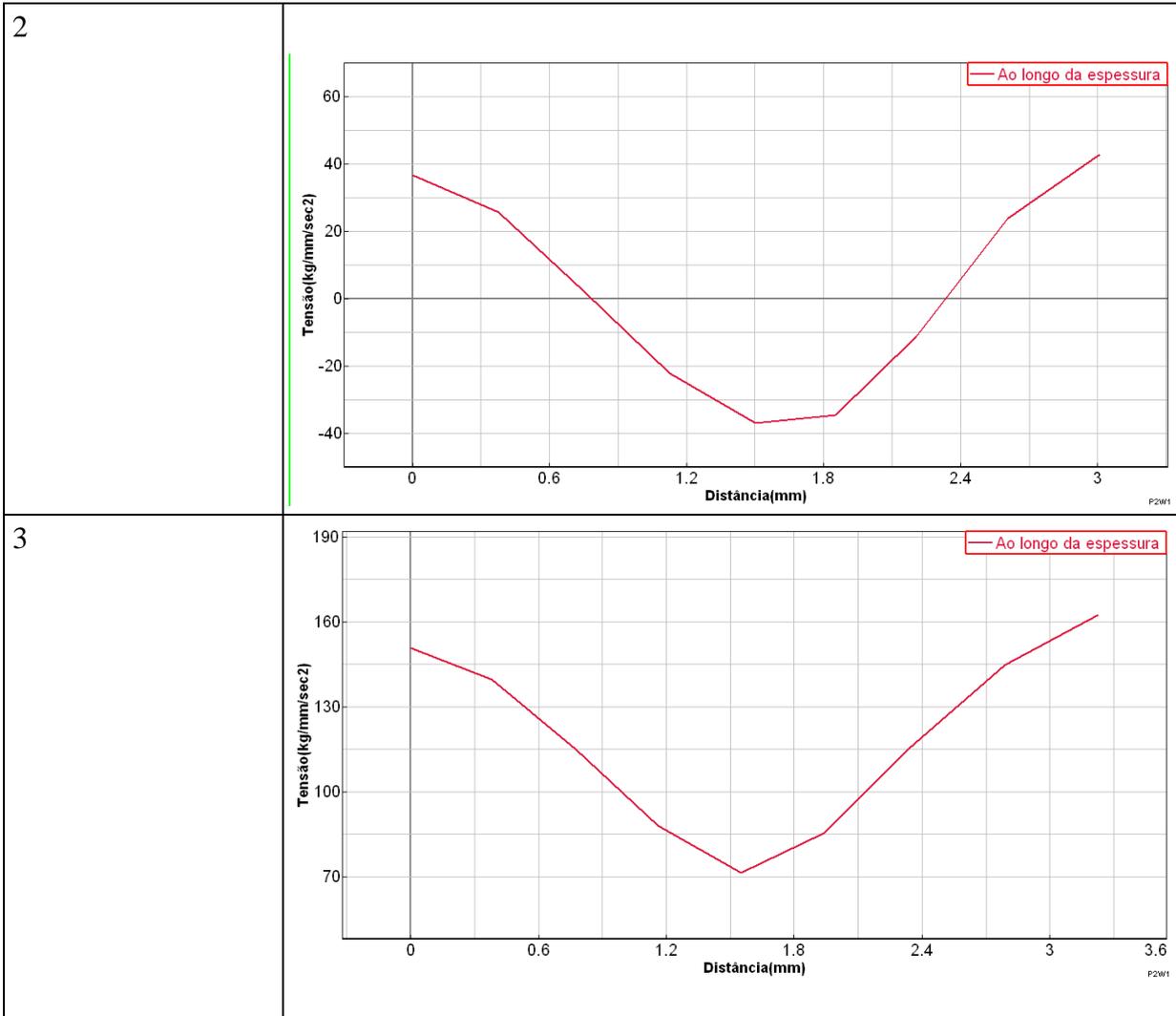
No terceiro caso, ao haver uma simetria em dois planos das condições de fixação, as curvas de tensões yy tanto da base como do topo são semelhantes, contudo junto à fronteira a peça apresenta um aumento acentuado dessas tensões, fruto da maior restrição existente.



Figura 147 - Caminho ao longo da espessura seleccionado para extracção do valor das tensões residuais yy

Tabela 26 - Tensões residuais yy ao longo da espessura da placa

Condição de fixação	Distribuição das tensões residuais yy #2
1	



A representação das tensões residuais y_y ao longo da espessura da placa dá-nos a noção da existência ou não de simetria das condições de fixação segundo Y. No caso de fixação 2 e 3, a tensão tanto na base como no topo apresentam valores semelhantes, sendo os valores máximos obtidos a meia espessura. No primeiro caso de fixação, por haver fixação nos vértices da base e liberdade de movimento nos do topo, a tensão é evidentemente máxima na base.

4.1.4.5.3 Tensões segundo xx

Seguido a mesma atribuição dos nós para extracção dos resultados, obtém-se para os valores das tensões residuais xx ao longo da superfície superior e inferior da peça.

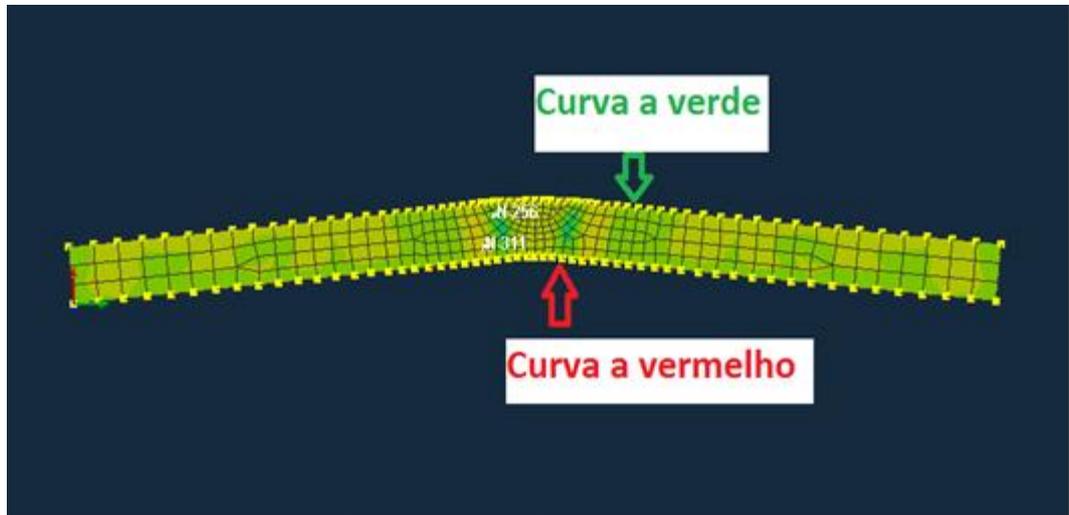
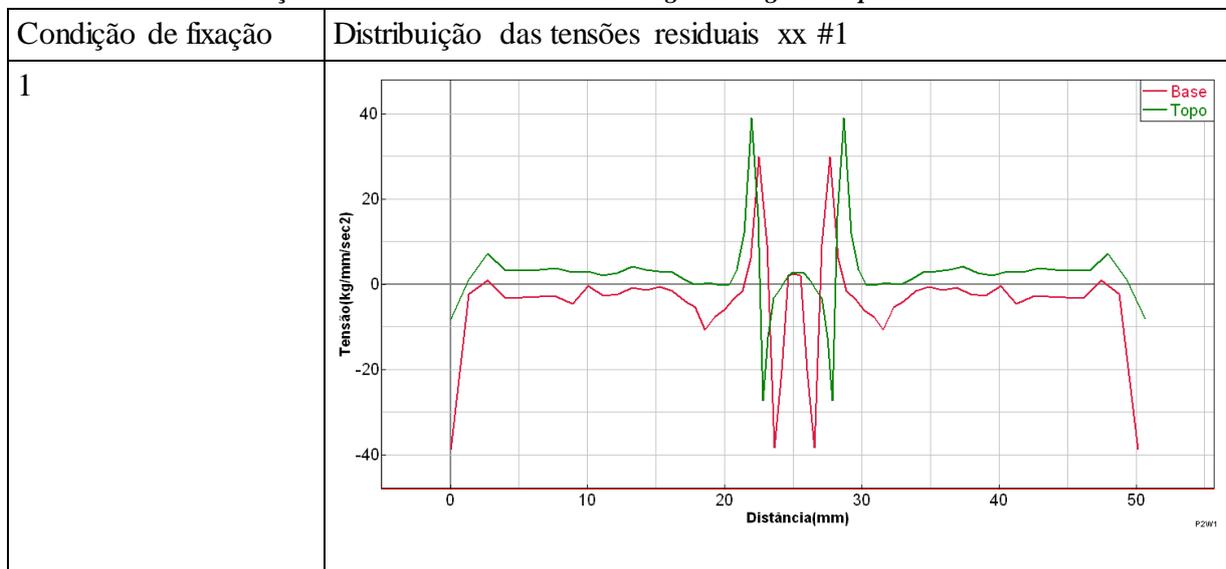
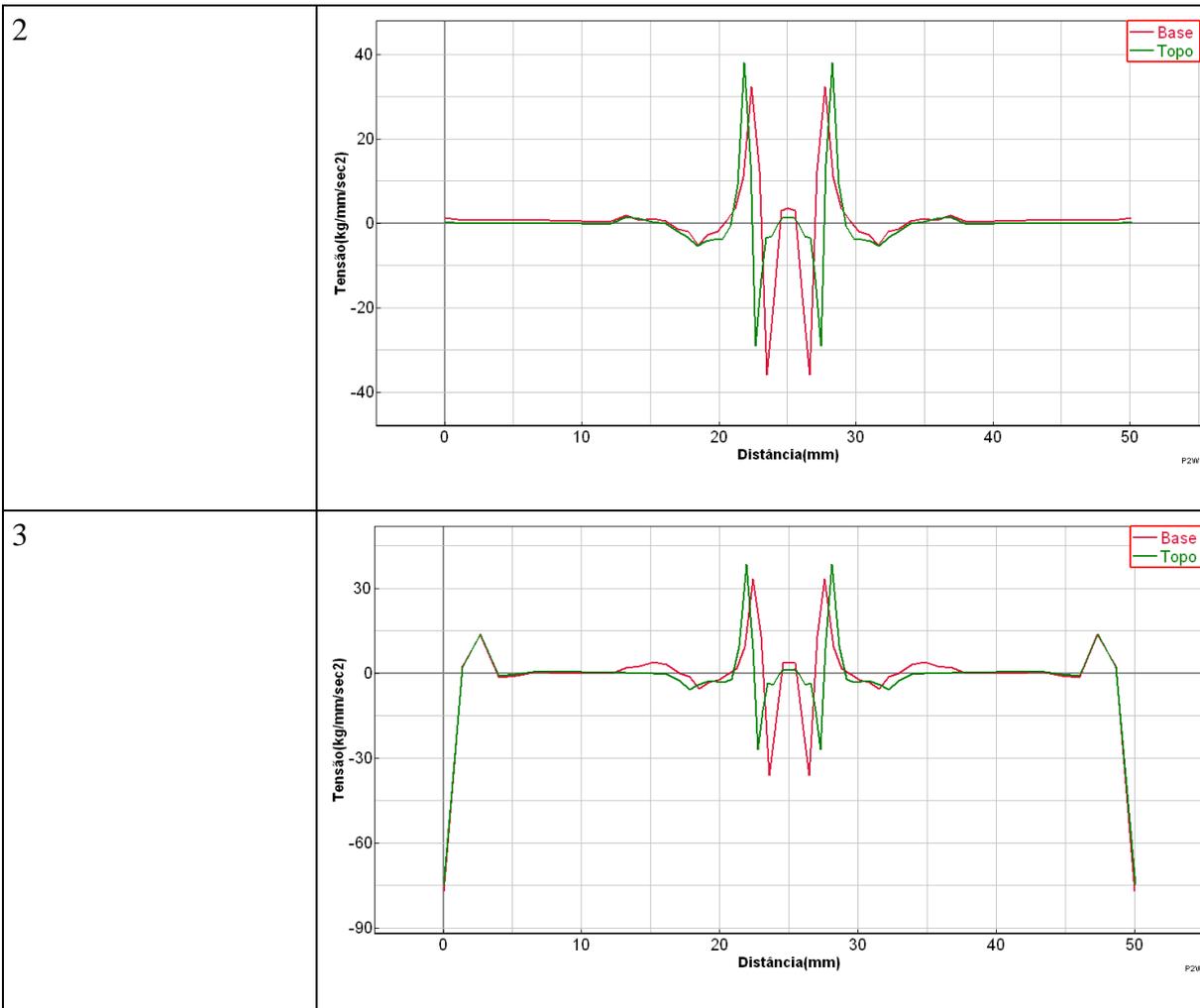


Figura 148 - Caminhos escolhidos para extracção dos valores das tensões residuais xx e respectiva cor nos gráficos

Tabela 27 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da largura da placa





São as tensões de menor interesse já que apresentam valores manifestamente baixos. Em todo o caso os valores máximos obtidos rondam os 40 MPa sendo no 3º caso de fixação (onde há restrição de movimento em X) que os valores aumentam subitamente junto à fronteira da placa.

As tensões xx segundo uma recta perpendicular à direcção da espessura, Figura 149, apresentam a seguinte distribuição:

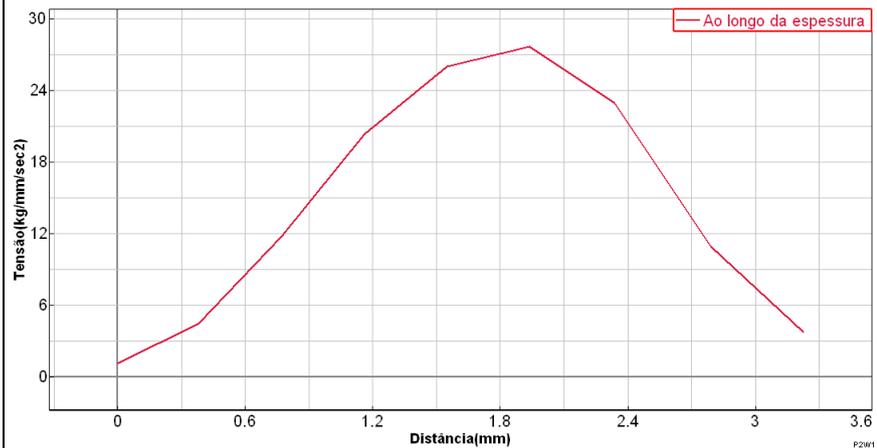


Figura 149 - Caminho para extracção dos valores das tensões residuais xx ao longo da espessura e respectiva cor nos gráficos

Tabela 28 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da espessura da chapa

Condição de fixação	Distribuição das tensões residuais xx #2
1	
2	

3



Os valores máximos para tensões xx apresentam-se a meia espessura, seguindo uma distribuição normal. Os valores são da mesma ordem de grandeza e apresentam distribuições semelhantes.

4.1.4.6 Comparação de deformadas

As deformadas medidas são as magnitudes dos deslocamentos normais. A simetria nas condições de fixação do 1º e 3º casos conduz a um campo de deformações igualmente distribuído, o que não se verifica para o segundo caso de fixação. Nesse segundo caso, o vértice inferior direito permite movimentação longitudinal, conduzindo a uma expansão da peça na direcção Y.

O campo de deformações representado para cada caso é válido única e exclusivamente para esse caso, dado que na barra lateral do espectro estão presentes os valores máximos das deformações. Assim, as zonas a roxo correspondem às zonas de maior deformação para cada caso.

As maiores deformações são portanto as encontradas no modelo contendo as condições de fixação 1, Tabela 19. Devido à restrição de movimento em todas as direcções nos vértices inferiores da secção de corte da placa, esta tende a flectir na presença do calor da soldadura.

O mesmo efeito é atenuado no segundo caso de fixação, já que a peça tem liberdade de movimento segundo Y. Será portanto nessa região onde as deformações serão máximas para esse caso, pois a mesma permitirá uma maior liberdade de movimento no que toca a expansões e contracções.

No terceiro caso de fixação, ao haver maiores restrições de movimento, a peça não terá a liberdade para flectir, sendo a deformação máxima localizada na zona do cordão de soldadura.

Tabela 29 - Comparação dos valores das deformadas com razão de ampliação 2x para três instantes de tempo e várias condições de fixação

C.f. / instante tempo	1	2,5	60
1	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 0.812474 at Node 6</p> <p>2 / 1.000000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 2.38991 at Node 93</p> <p>4 / 2.500000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 2.15522 at Node 94</p> <p>12 / 60.000000</p>
2	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 0.337741 at Node 6</p> <p>2 / 1.000000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 0.22125 at Node 163</p> <p>4 / 2.500000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 0.0 at Node 415 Max = 0.16482 at Node 3</p> <p>12 / 60.000000</p>
3	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.82356e-022 at Node 2 Max = 0.131067 at Node 5</p> <p>2 / 1.000000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.51516e-022 at Node 2 Max = 0.18711 at Node 5</p> <p>4 / 2.500000</p>	<p>TESTE2D NOME : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.71934e-022 at Node 3 Max = 0.119721 at Node 6</p> <p>12 / 60.000000</p>

4.2 Caso de estudo 3D

Feita a discretização da criação e análise do modelo 2D bem como a abordagem dos aspectos fundamentais do *software* de pré processamento e pós-processamento, aplicar-se-ão esses conceitos na criação de um modelo 3D para comparação de resultados.

4.2.1 Lista de partes

As placas da Figura 79 serão compiladas numa única placa contendo uma malha de método dos elementos finitos de acordo com as necessidades do modelo.

4.2.2 Pré-processamento do modelo

Graças à abordagem deste assunto no capítulo referente ao caso de estudo 2D, a descrição dos procedimentos será feita de forma menos exaustiva, focando mais pormenorizadamente os pontos de divergência com o modelo 2D.

4.2.2.1 Geometria

Como anteriormente referido, o modelo deverá ter a sua base assente no plano XOY.

Para a criação do modelo 3D optou-se por partir da elaboração dos quatro pontos gerais, semelhante ao caso 2D, sendo depois estes copiados e transladados 150 mm segundo Z.

Tabela 30 - Coordenadas gerais dos pontos para translação

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
1	0	0	0
2	3	0	0
3	3	50	0
4	0	50	50

Na opção *Node – Transform*, seleccionar os nós gerais criado, Tabela 30, utilizando a opção *Translate*, definindo a cota de profundidade Z e escolhendo a opção *Copy*. A *Part ID* “*” significa que será a mesma da dos pontos que estiveram na sua origem.

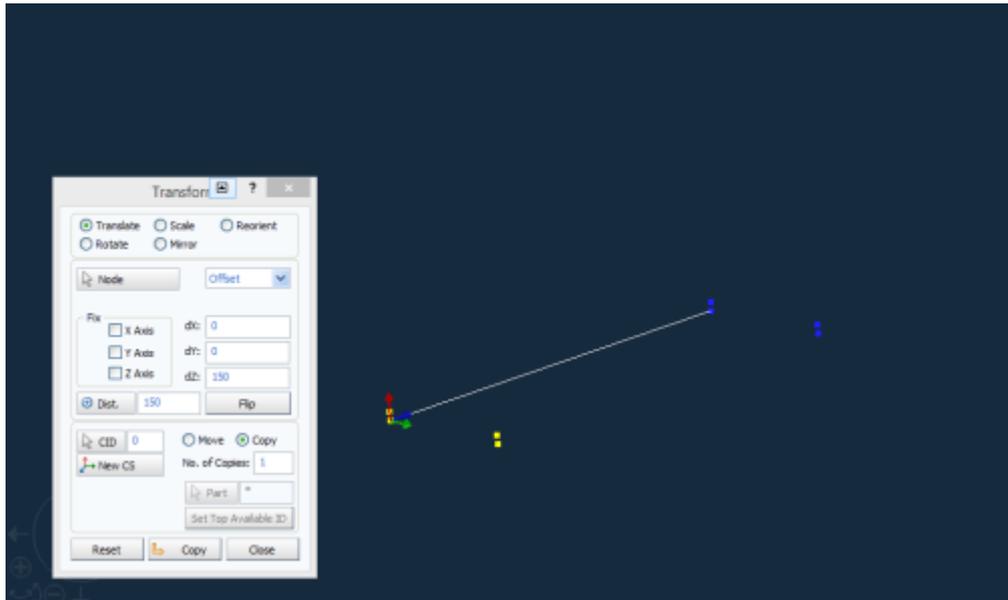


Figura 150 - Translação dos pontos gerais

Estando os pontos para a criação de um modelo 3D definidos, procede-se à criação de superfícies na opção *Surface – Blend (Spline)*. Todas as 6 superfícies devem ser ligadas nesta operação, devendo as linhas apresentar cor verde, Figura 151. A *Part ID* definida será a 1.

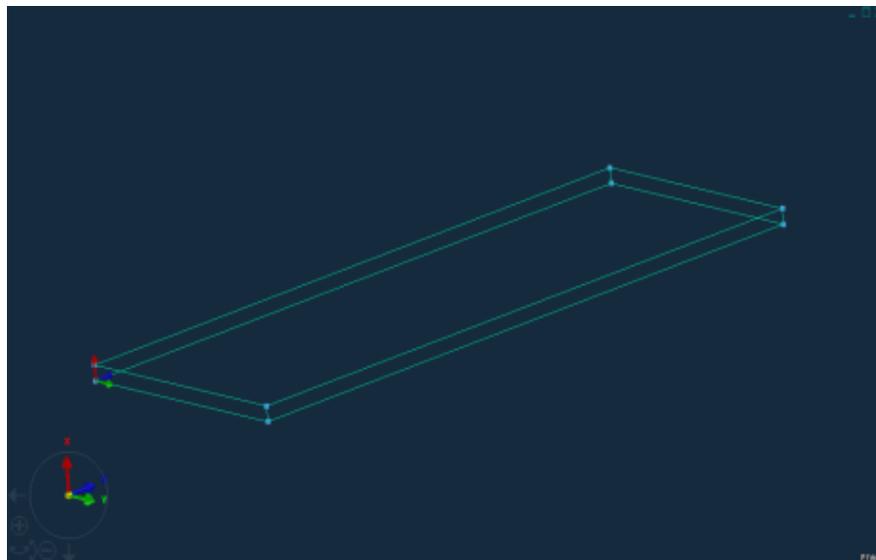


Figura 151 - Superfícies gerais da placa

Seguidamente a placa global é dividida em duas metades, estando os pontos para auxílio na operação assinalados na Tabela 31. A união destes pontos dá-se por intermédio da ferramenta *Curve – Sketch*, contendo a mesma *Part ID* das superfícies geradas, Figura 152.

Tabela 31 - Coordenadas dos pontos de auxílio para divisão da placa

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
9	0	25	0
10	3	25	0
11	0	25	150
12	3	25	150

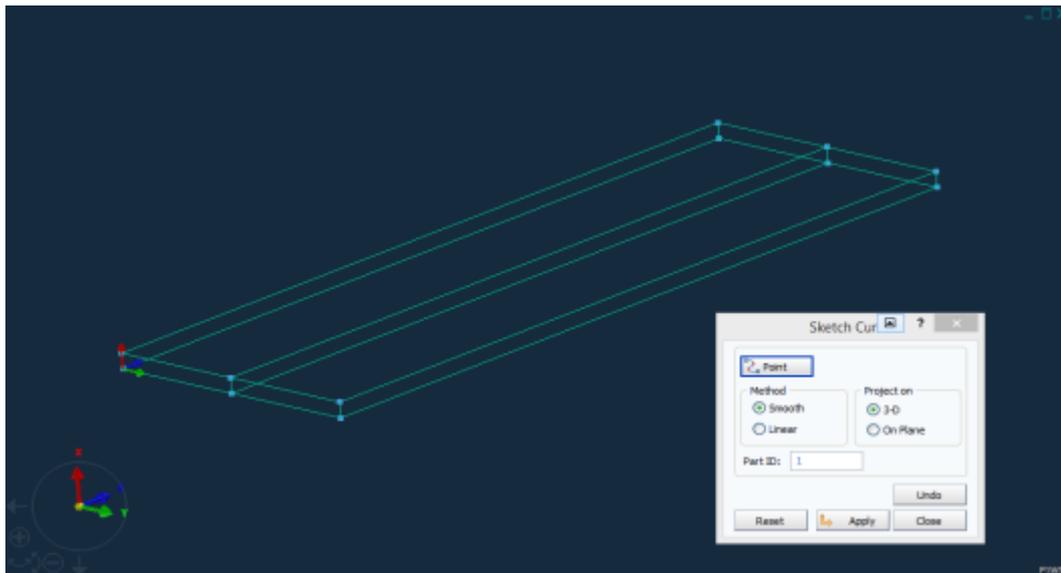


Figura 152 - Divisão da placa

O passo seguinte é a definição das zonas de refinamento para o cordão de soldadura. Duas maneiras poderiam ser encaradas para tal:

- Definir na superfície frontal da placa o aspecto do modelo 2D, sendo este aplicado continuamente ao longo da placa segundo Z.
- Definir zonas de refinamento no topo da placa, sendo esta aplicada a toda a peça ao longo de X.

Tendo de respeitar a continuidade de elementos de método de elementos finitos aquando da geração da malha, a primeira opção descrita apesar de válida, iria conduzir a um maior número de elementos (para bons resultados, segundo Z os elementos seriam muito pequenos), o que condicionaria o tempo de processamento do modelo. Outra condicionante seria a análise de camadas a meio da espessura da placa, já que os elementos não estariam ordenados e dispostos de forma paralela com o topo e base. Seria apenas possível obter análises razoáveis para o topo e para a base, nunca para meia espessura por exemplo.

A primeira opção tem o inconveniente de não dispor de uma zona de refinamento específico envolvente ao cordão de soldadura, sendo contudo mais prática em termos de análise de resultados e geração da malha de elementos finitos.

Optando pelo segundo caso de definição do refinamento, começa-se por se traçarem os pontos limites do cordão de soldadura (cordão apresenta 4 mm de largura).

Tabela 32 - Coordenadas dos pontos para criação da zona do cordão de soldadura

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
13	0	23	0
14	3	23	0
15	0	27	0
16	3	27	0
17	0	23	150
18	3	23	150
19	0	27	150
20	3	27	150

À semelhança de etapas anteriores, estes pontos são unidos na ferramenta *Curve – Sketch*, sendo a sua *Part ID* a mesma dos restantes elementos presentes até então no modelo, Figura 153.

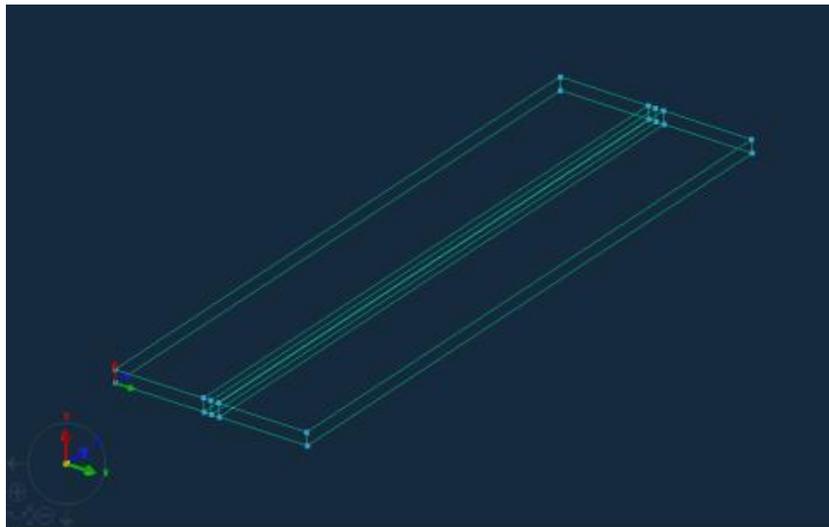


Figura 153 - Zona de refinamento do cordão de soldadura

Outras zonas de refinamento longitudinal ao cordão de soldadura serão definidas com vista ao progressivo aumento do tamanho do elemento 3D desde o cordão de soldadura até à periferia.

Uma zona de refinamento sensivelmente a meio de cada placa será criada com o auxílio dos seguintes pontos presentes na Tabela 33.

Tabela 33 - Coordenadas dos pontos de auxílio para criação de zona de refinamento longitudinal

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
21	0	15	0
22	3	15	0
23	0	35	0
24	3	35	0
25	0	15	150
26	3	15	150
27	0	35	150
28	3	35	150

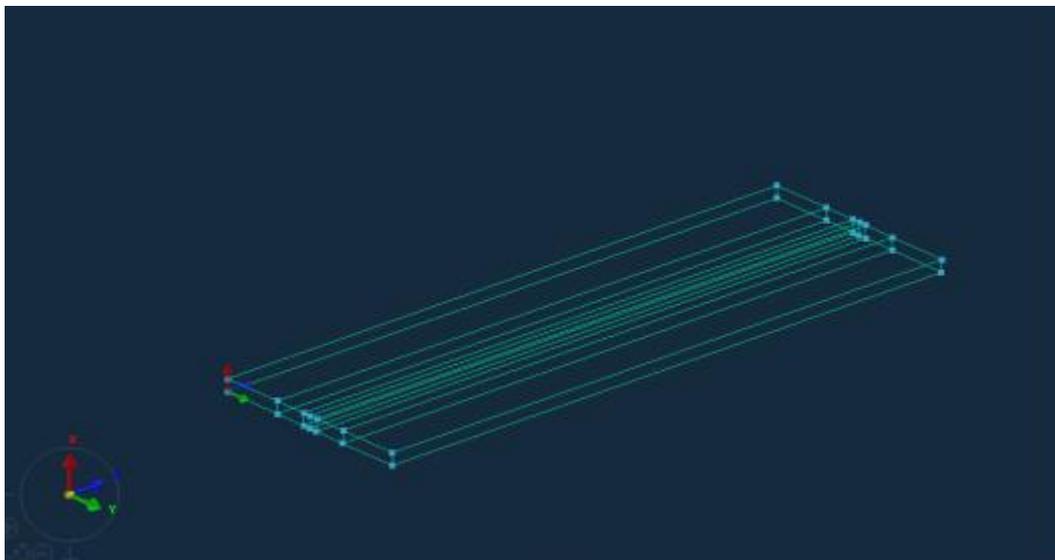


Figura 154 - Zonas de refinamento longitudinal

Igualmente importante é a criação de uma zona de refinamento transversal. Mais do que ser prática em questões de elaboração de malha de elementos finitos, é preciosa pelo facto de se poderem ter secções de corte perfeitas ao longo da peça, analisando resultados de forma mais precisa, como será visto mais adiante durante a elaboração da malha de MEF na análise de resultados em *Visual Viewer*.

A peça será dividida em três ao longo de Z, sendo portanto definidos os seguintes pontos auxiliares, Tabela 34.

Tabela 34 - Coordenadas dos pontos auxiliares para refinamento transversal

Nº do nó	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Coordenada Z (mm)
25	0	0	50
26	3	0	50
27	0	0	100
28	3	0	100
29	0	50	100
30	3	50	100
31	0	50	50
32	3	50	50

O procedimento para união dos pontos é o mesmo já tratado nesta secção.

As muitas linhas presentes intersectadas no modelo deverão ser separadas entre pontos de intersecção, sendo útil para elaboração da malha de método de elementos finitos em parcelas da peça (a referida malha será um conjunto de várias malhas ao longo da peça).

Para facilitar a execução do procedimento, seleccionar o modo de vista *Smooth Wireframe*, Figura 156.

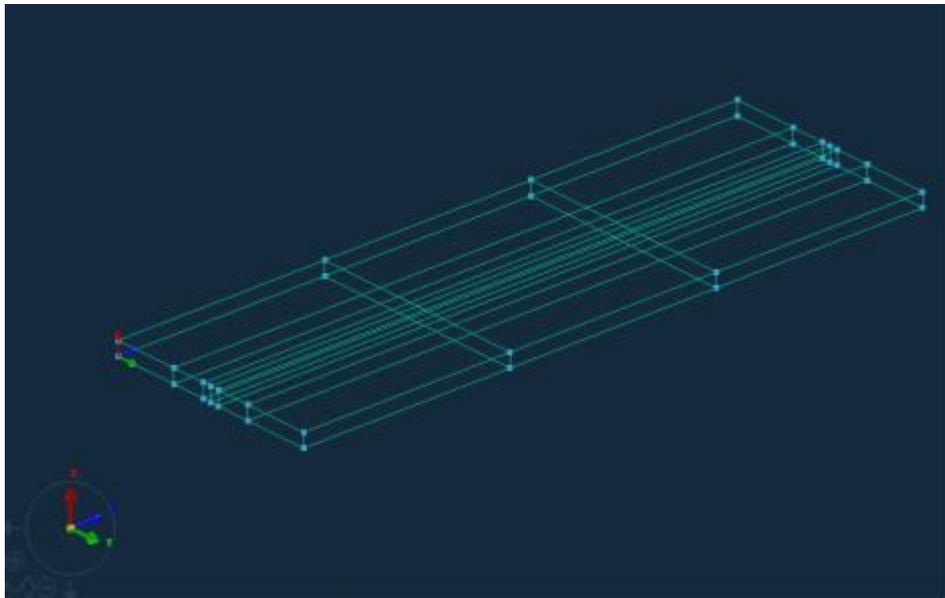


Figura 155 - Introdução de zonas de refinamento transversal

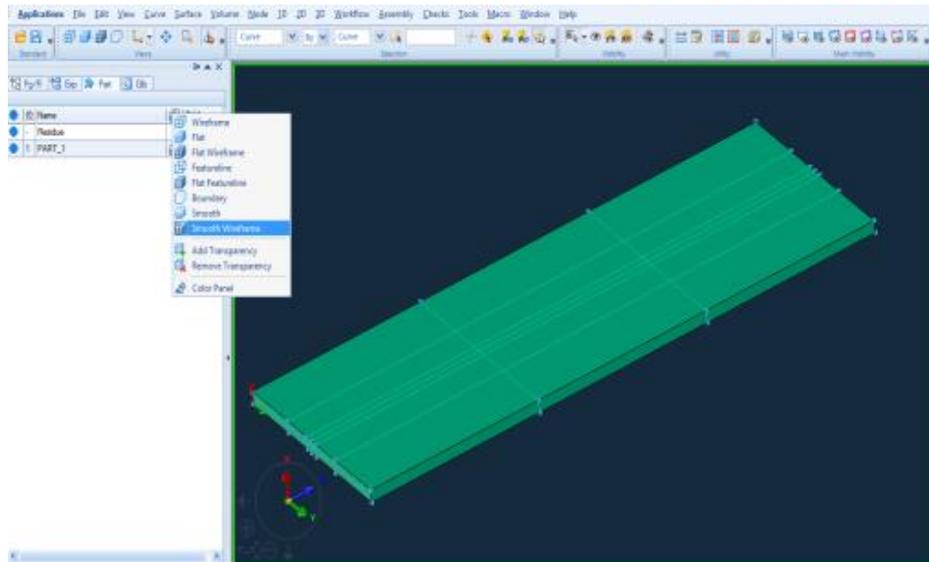


Figura 156 - Modo de visualização Smooth Wireframe

A divisão das linhas de refinamento, Figura 157, é realizada na opção *Curves – Trim/Split*, seleccionando a opção *Split*. As curvas desejadas a serem divididas devem ser seleccionadas, sendo depois escolhida a curva divisora das mesmas. O processo é repetido para todas as linhas de intersecção, quer sejam longitudinais ou transversais.

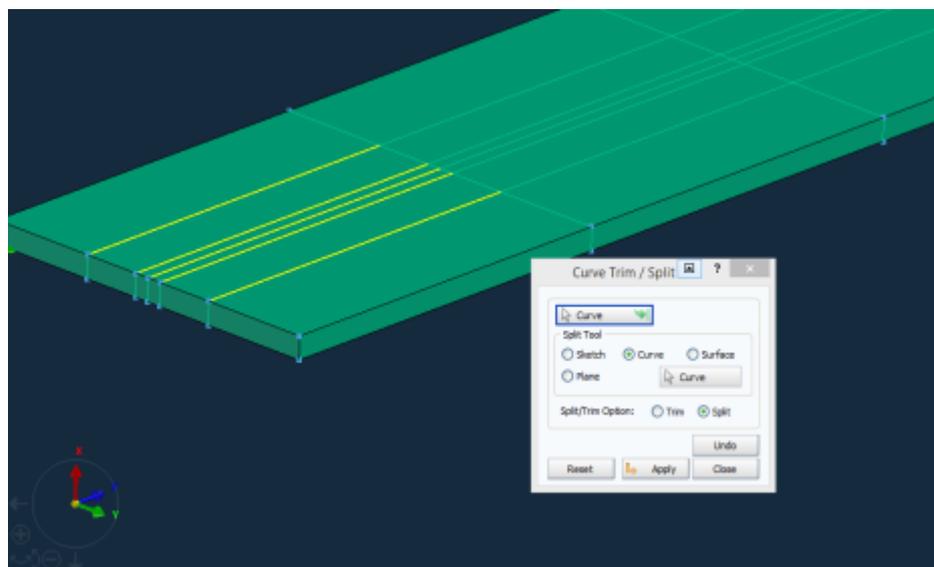


Figura 157 - Divisão das linhas de selecção

Para finalizar a geometria em *Visual Mesh*, a chapa deverá ser seleccionável entre cada área definida para as zonas de refinamento, Figura 158. Tal como no caso de estudo 2D, esta é dividida na ferramenta *Surface – Split*, sendo escolhida a totalidade da chapa e depois seleccionadas as curvas (definindo a opção de selecção *Curves* no menu *Split*) para separação da mesma.

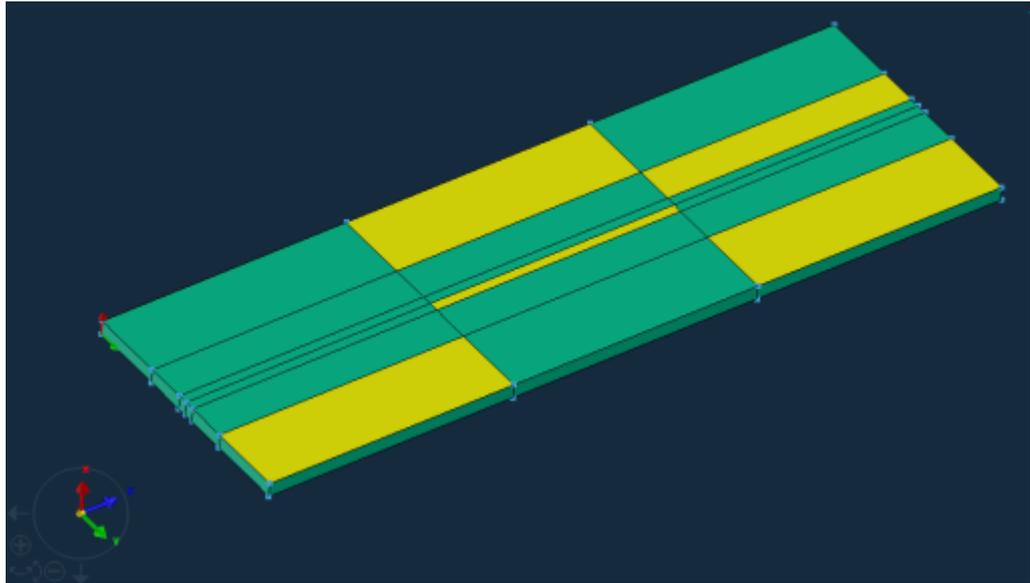


Figura 158 - Superfícies divididas

4.2.2.2 Geração da malha em Visual Mesh

Concluída a geometria da peça, estão prontas as condições para elaboração de malha de elementos finitos. Como dito anteriormente a este subcapítulo, a malha será gerada a partir da superfície de topo de peça, sendo esta realizada em pequenas parcelas que originarão a malha total. A malha 2D superficial gerada será posteriormente alvo de uma operação de *3D Sweep (Drag)* de forma a serem gerados os elementos 3D.

Começando na zona correspondente a 1/3 da metade do cordão de soldadura, Figura 159, deve ser gerado um mínimo de 2 elementos na perpendicular à direcção do cordão de soldadura.

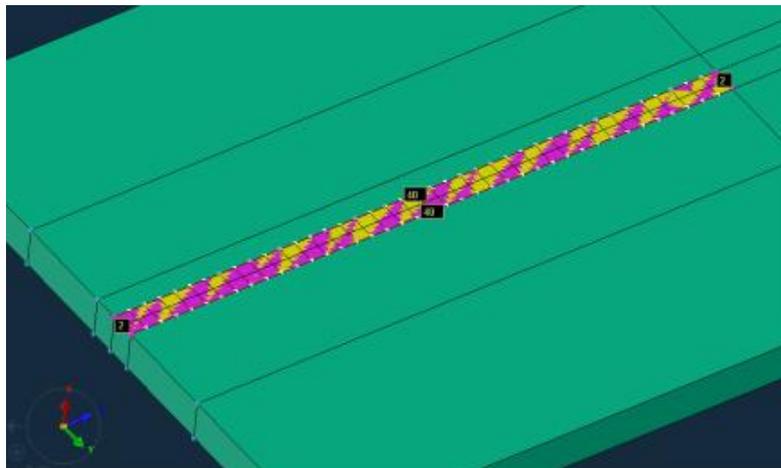


Figura 159 - Malha de MEF para zona do cordão de soldadura

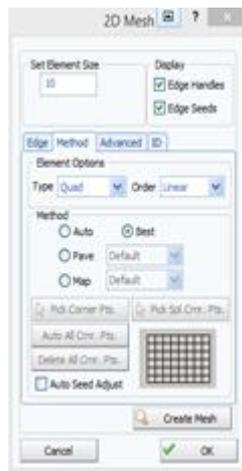


Figura 160 - Parâmetros malha MEF cordão de soldadura

O tipo de elementos utilizado será quadrilátero, Figura 160, sendo o método escolhido o “Best”. Procurou-se que o tamanho dos elementos 2D se assemelhasse o máximo possível a um quadrado. A *Part ID* como no caso 2D, deverá constar de uma referência diferente aos elementos criados até então para o modelo, sendo escolhida a *Part ID 11*. Torna-se particularmente útil para processos de correção de malha, sendo possível editar cada uma em separado, caso se atribuam identificações diferentes a cada parcela gerada.

A malha gerada toma então a forma representada (em modo de visualização *Smooth Wireframe*), Figura 161.

A sua transformação em elementos 3D obtém-se no menu *3D – Sweep (Drag)*, tendo o cuidado de se gerarem no mínimo quatro elementos em profundidade no cordão de soldadura. Isto acarretará uma menor processo na obtenção dos resultados comparativamente ao caso de estudo 2D, que tinha zonas de refinamento específico para o cordão de soldadura. Contudo, o tempo de processamento, como referido, será menor.

A *Part ID* escolhida foi a 12, sendo então desactivada do modo de visualização a *Part ID 11*, para não haver sobreposição visual das mesmas perante o utilizador.

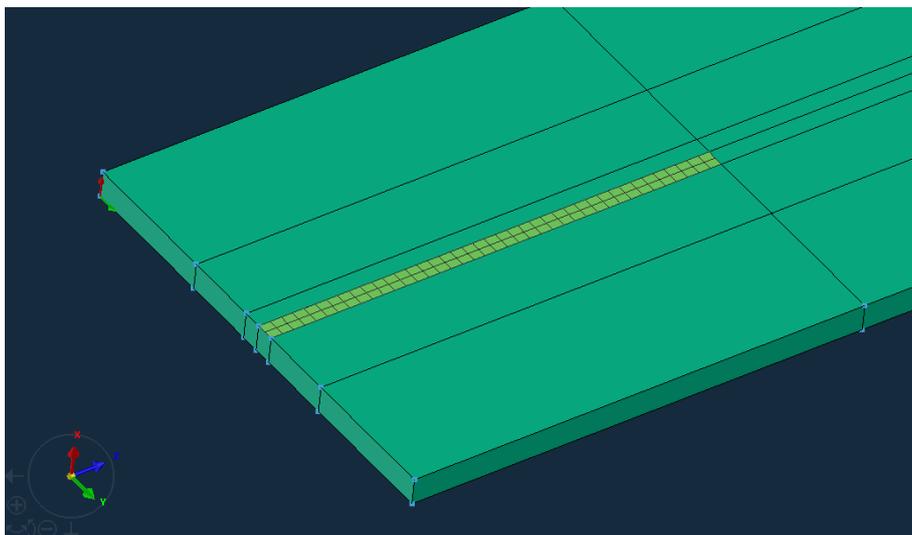


Figura 161 - Elementos 2D gerados no cordão de soldadura

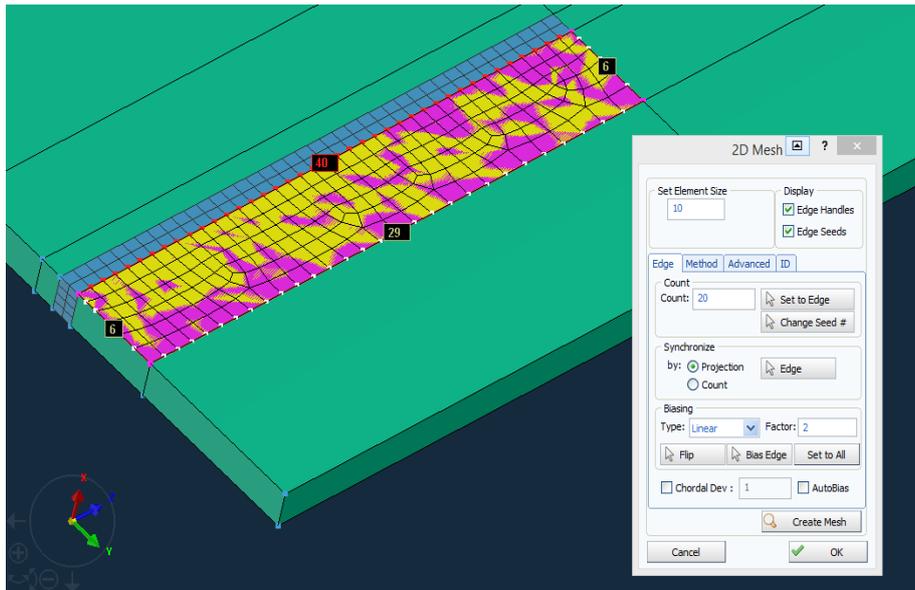


Figura 162 - Malha MEF zona envolvente ao cordão

Na criação da zona de refinamento envolvente ao cordão de soldadura, o número de elementos de fronteira deverá ser igual de forma a garantir continuidade nos mesmos. Para tal, activando o campo *Across Parts* no menu *2D – Automesh Surfaces – Advanced*, e atribuindo a *Part ID 21*, o número de elementos de fronteira ficará bloqueado, Figura 162.

O método utilizado foi novamente o *Best*, sendo aplicado um *Bias – Linear* de factor 2 às laterais de 6 elementos da secção.

Para facilitar a reprodução dos elementos 3D desta parcela gerada, no campo de visualização os elementos do cordão de soldadura são apagados, de forma no *3D – Sweep (Drag)*, os elementos 2D agora gerados serem escolhidos com menor probabilidade de ocorrer algum erro por parte do utilizador. Não esquecer que o número de camadas geradas no processo de elaboração dos elementos 3D, deverá ser o mesmo do gerado para o cordão de soldadura (4 elementos), Figura 163.

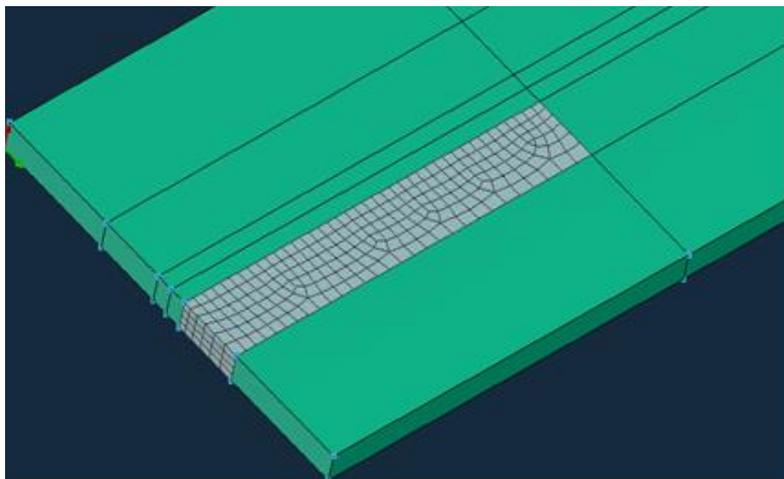


Figura 163 - Elementos 3D zona envolvente ao cordão de soldadura

Utilizando a mesma lógica (diferente *Part ID*, igual método, tipo de elemento e *bias-linear* aplicado às laterais) para a parcela da periferia, o resultado pode ser encontrado na Figura 164.

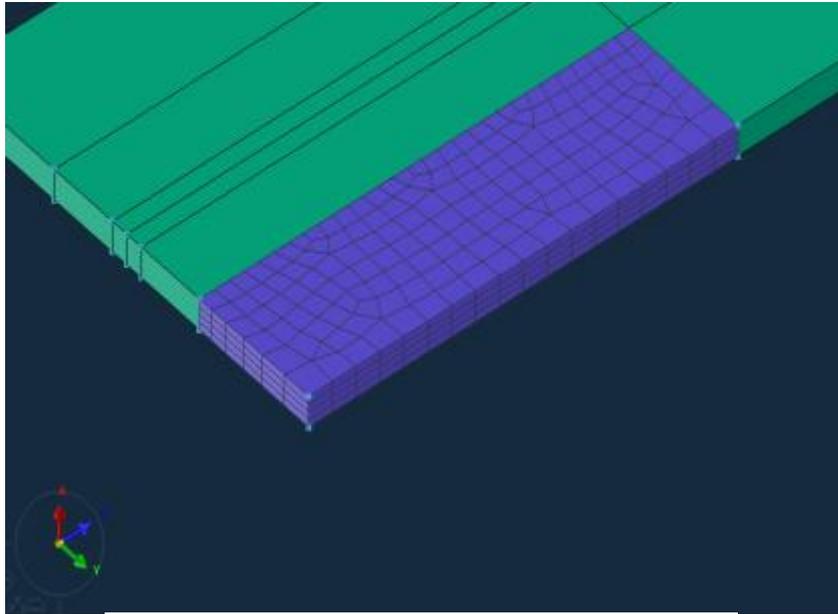


Figura 164 - Elementos 3D zona periferia

Estando o essencial da malha de método dos elementos finitos criada, é usada a ferramenta *3D – Transform* de forma a transladar e espelhar as secções criadas. A cada multiplicação de cada secção, a identificação da parte deverá ser coincidente com a sua origem. Desta forma o resultado final terá o aspecto apresentado na Figura 166.

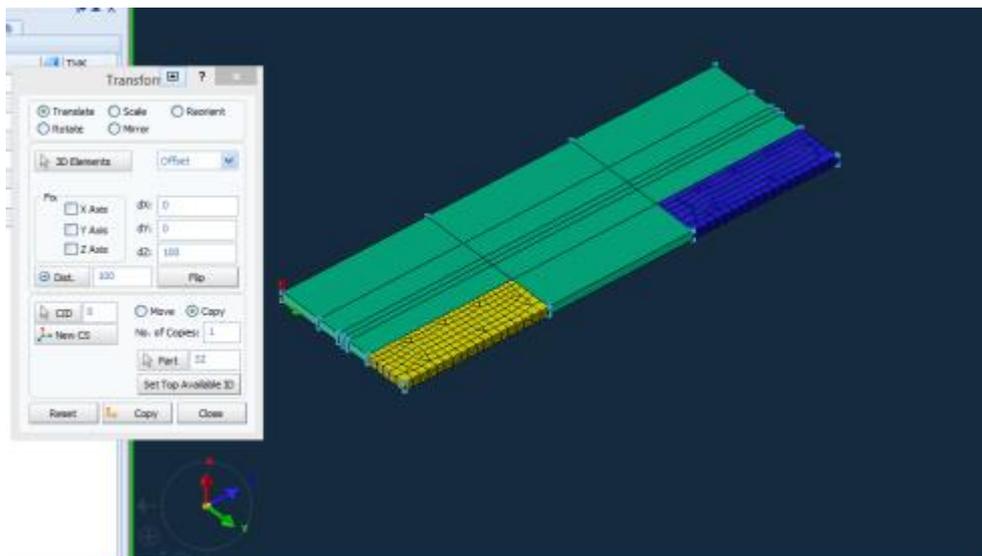


Figura 165 - Cópia dos elementos gerados ao longo das secções da peça

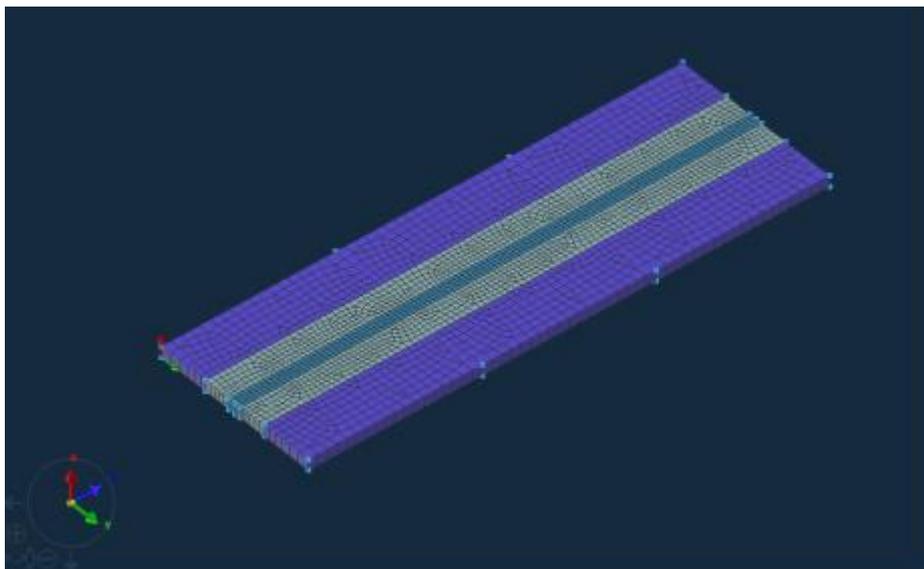


Figura 166 - Malha elementos finitos final

Nota: Ao copiar cada secção ao longo de Z, copiar primeiro a secção para o último terço da peça e de seguida para a metade desta, Figura 165.

4.2.2.3 Correção e qualidade da malha

A geração da malha originou sobreposição de nós que devem ser unidos, para tal utiliza-se a opção *Checks – Coincident Nodes*, sendo feita a sua fusão, Figura 167.

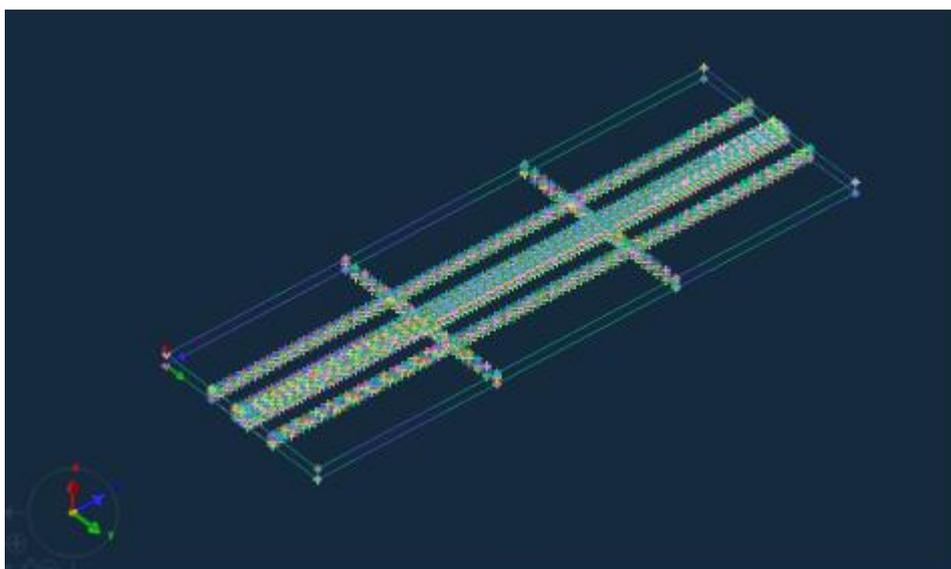


Figura 167 - Nós coincidentes

Posto isto e não havendo elementos coincidentes, passa-se para a verificação da qualidade da malha de método dos elementos finitos, *Checks – Element Quality*, escolhendo elementos 3D para verificação, Figura 168.

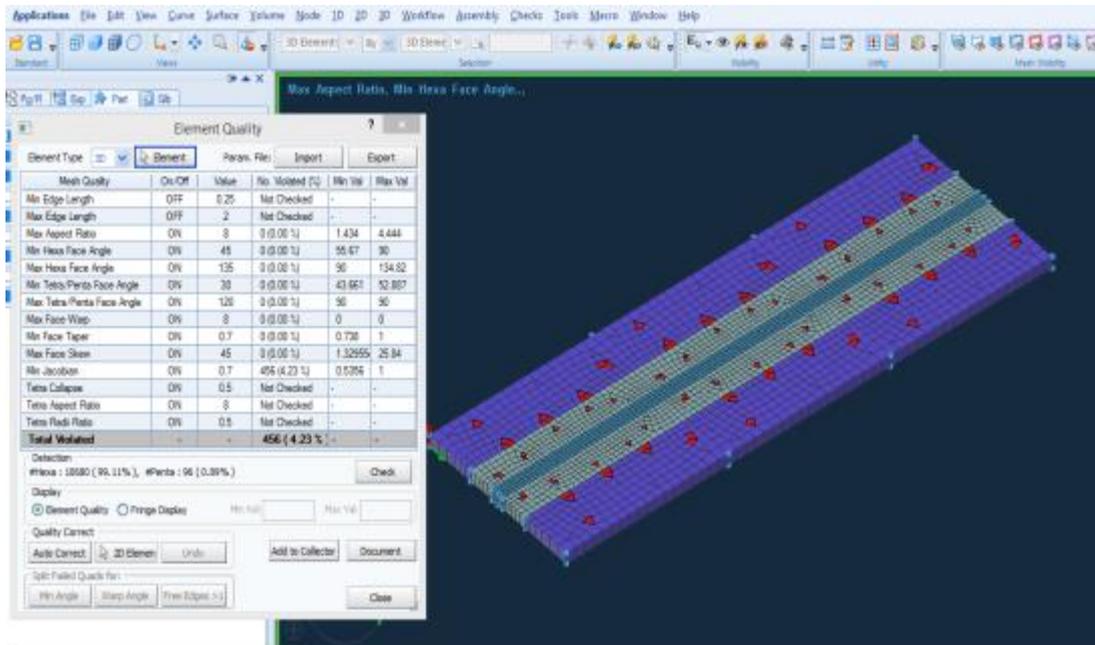


Figura 168 - Qualidade dos elementos 3D da malha MEF

A percentagem de elementos fora dos limites da definição de elemento correto, fixa-se nos 4,23%, Figura 168, sendo que após *Auto Correct* manteve esse valor. À semelhança do que foi feito para o caso de estudo 2D, os tamanhos máximo e mínimo dos elementos não entraram da análise, sendo desactivados na mesma (opção *Off* em *Min/Max Edge Length*).

4.2.2.4 Criação de grupos

Da mesma forma como foram escolhidos para o caso de estudo 2D, o procedimento mantém-se para o 3D, alterando o tipo de elemento escolhido (elemento 3D) e acrescentando novos grupos de forma à extracção de resultados em várias secções de corte ao longo da peça.

Começando pela selecção dos grupos para definição das propriedades do material. Cada chapa conterà os seus elementos 3D agrupados separadamente. A forma mais fácil de extrair a totalidades destes elementos 3D será alterar a vista de forma a varrer com o cursor do rato toda a secção desejada. Esta seleccionará todos os elementos ao longo da direcção Z, Figura 169 e Figura 171.

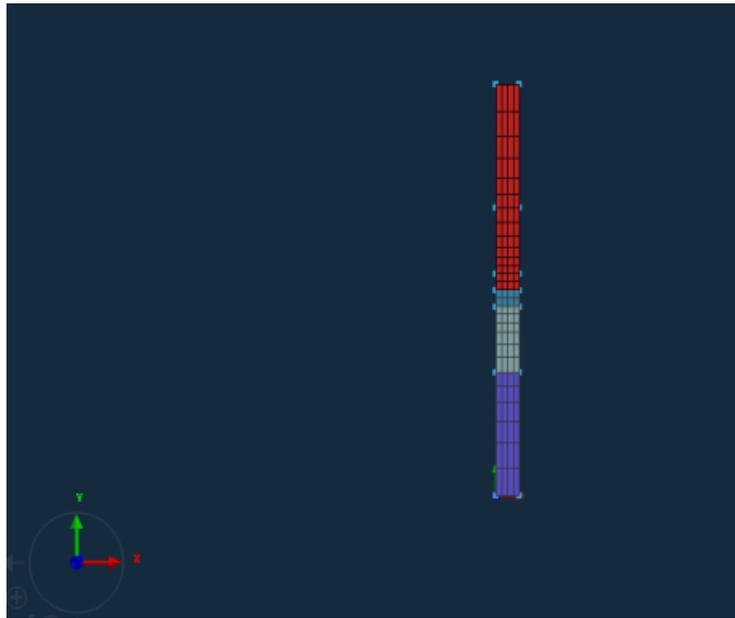


Figura 169 - Vista para selecção de todos os elementos 3D ao longo do plano normal ao da selecção do cursor do rato

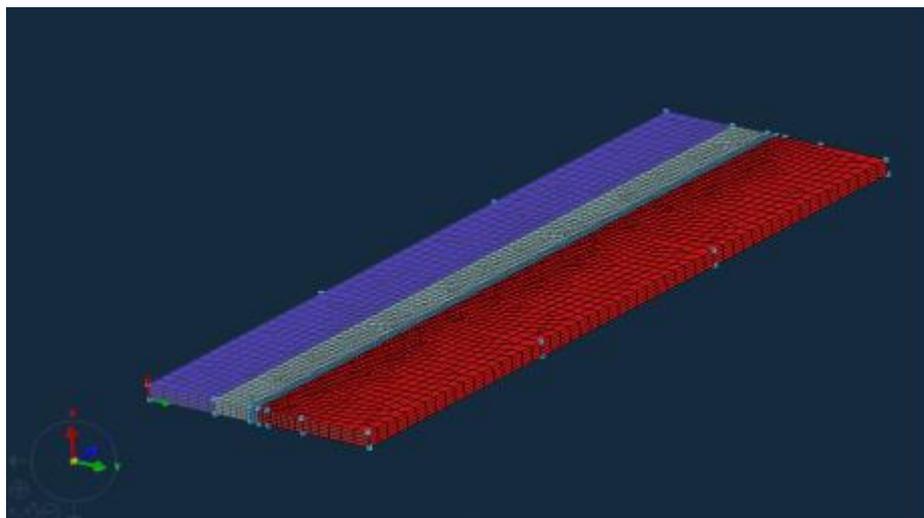


Figura 170 – Resultado da selecção

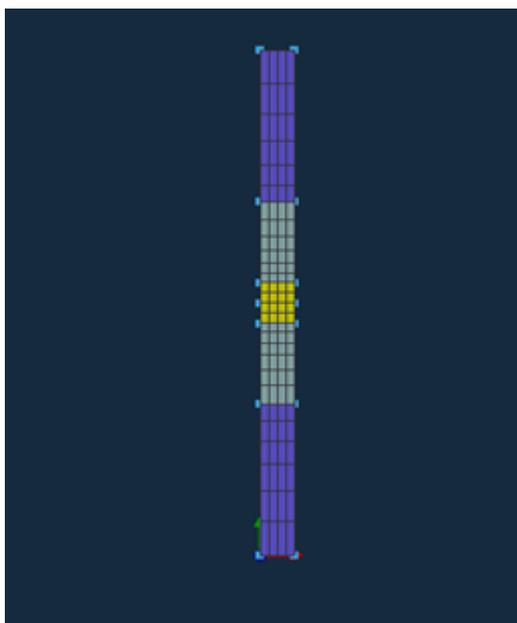


Figura 171 - Seleção dos nós para cordão de soldadura

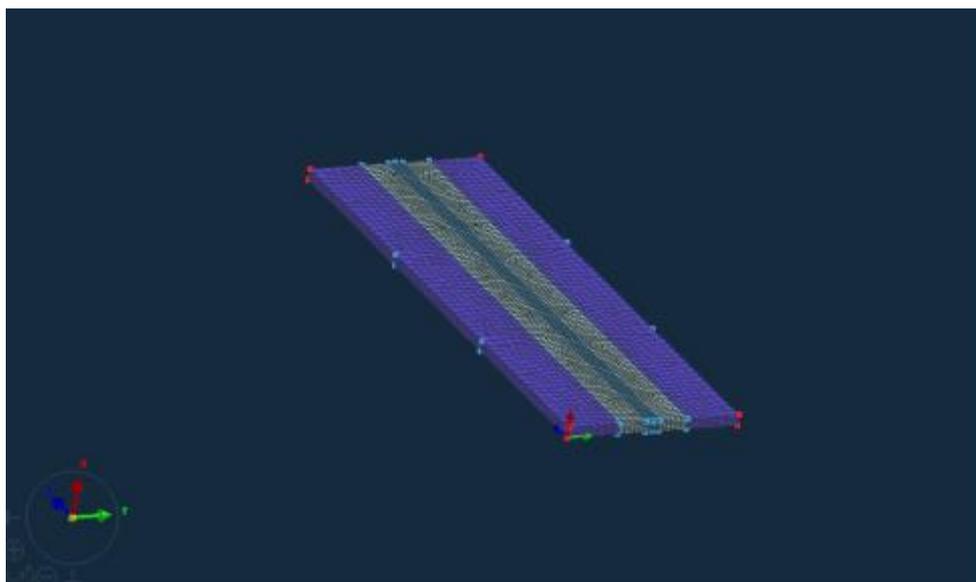


Figura 172 – Seleção dos nós para condições de fixação

De igual forma são agrupados os elementos 3D referentes ao cordão de soldadura, Figura 171, e os nós a serem utilizados nas condições de fixação (a cada nó corresponderá um grupo), Figura 172.

Cada terço da peça será agrupado igualmente em grupos de elementos 3D, Figura 174, de forma a poderem-se visualizar os efeitos da soldadura com precisão ao longo entre cada terça parte da peça. Também os elementos laminares da malha de MEF serão agrupados separadamente, sendo de interesse para obter as tensões residuais ao longo de Z para várias camadas da peça, Figura 173.

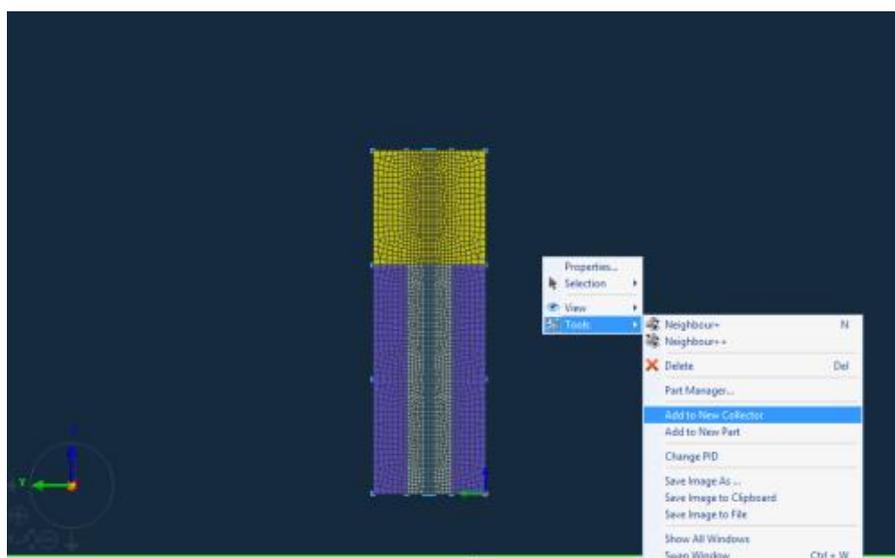


Figura 174 - Conjunto de elementos 3D referentes a 1/3° da peça

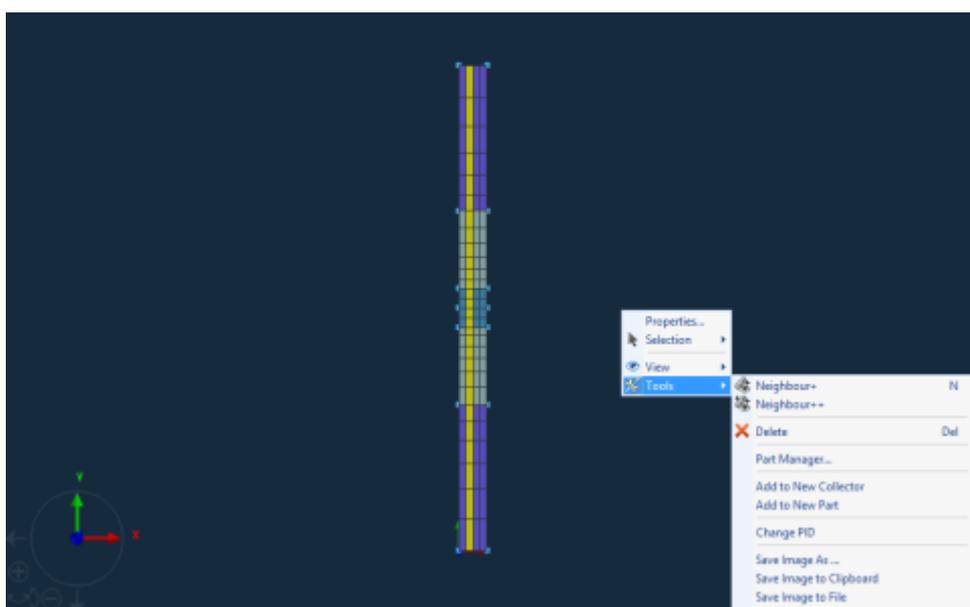


Figura 173 - Elementos 3D referentes a camadas laminares da malha MEF

4.2.2.5 *Visual Weld*

Escolhidos os grupos e estando em posse de um modelo isento de defeitos de concepção, começa-se por definir em *Visual Weld* a área relativa à transferência de calor por convecção. Serão escolhidos duas áreas diferentes, a primeira englobando a totalidade das superfícies da chapa e a segunda contendo todas as superfícies excepto a superfície de base da placa, Figura 175 e Figura 176. Posteriormente no capítulo dos resultados, serão expostas as diferenças a nível térmico entre as mesmas.

Para definição da mesma, utiliza-se a ferramenta *Tools – Generate Skin From 3D*.

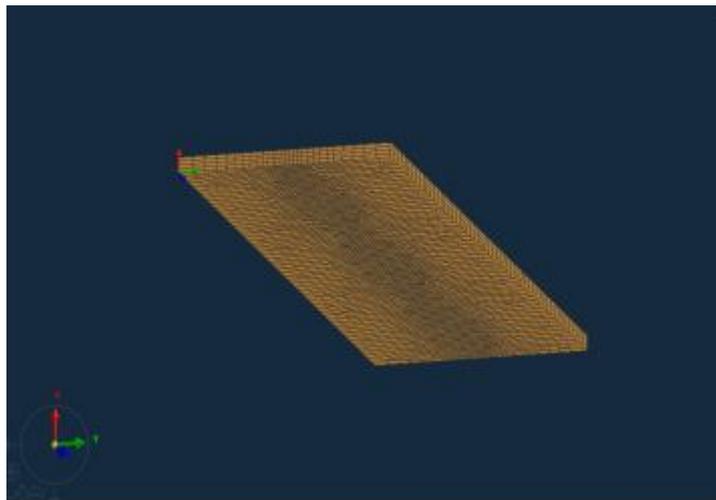


Figura 175 - Área de transferência de calor 1

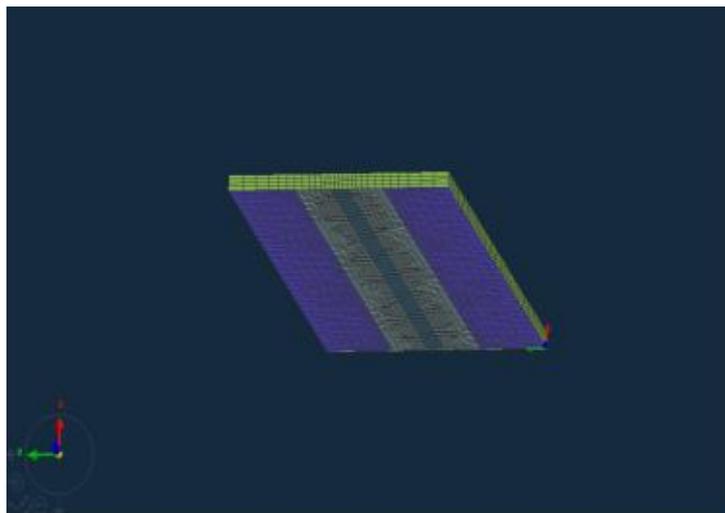


Figura 176 - Área de transferência de calor 2

A trajectória de soldadura irá abranger a totalidade dos 150 mm definidos ao longo de Z. Esta é criada em *Welding – Create Trajectory* pelo método *Two Node*. É geral acontecerem problemas na definição da trajectória de soldadura, já que a mesma poderá ter uma linha de referência não recta. A forma de corrigir isso será escolher o método de geração de trajectória *Three Node* e definindo assim as direcções de soldadura, Figura 177.

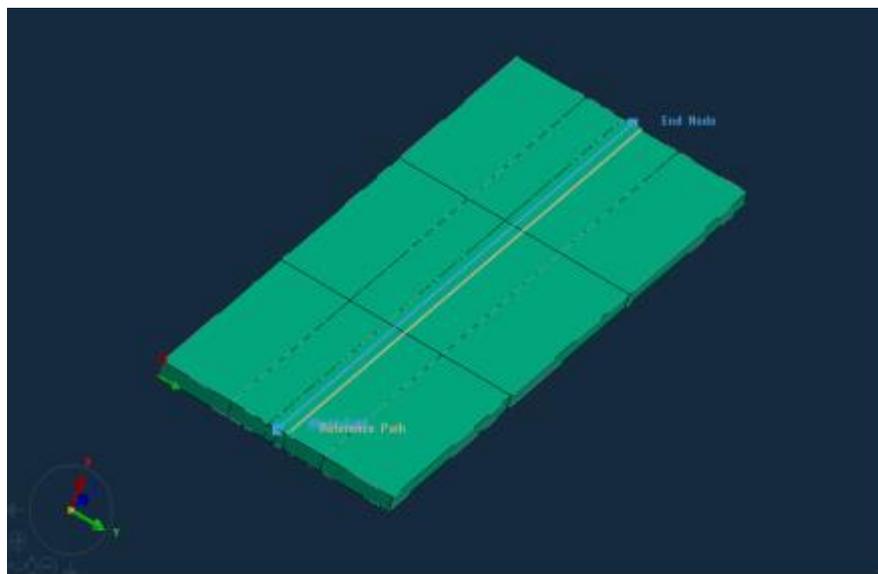


Figura 177 - Trajectória de soldadura

O trabalho realizado em *Visual Weld* ficará completo depois da geração dos parâmetros de soldadura, *Welding - Welding Advisor*, Tabela 35, Tabela 36 e Tabela 37.

Tabela 35 - Etapas 1, 2, 3, 4 e 9 do assistente de soldadura

Etapa 1 – Project Description	Etapa 2 – Global Parameter	Etapa 3 – Component Properties	Etapa 4 – Welding Process #1									
		<table border="1" data-bbox="925 660 1157 817"> <thead> <tr> <th>Component/Joint</th> <th>Material</th> <th>Thickness</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Collector_1</td> <td>S355J2G3</td> <td>NA</td> </tr> <tr> <td>Collector_2</td> <td>S355J2G3</td> <td>NA</td> </tr> </tbody> </table>	Component/Joint	Material	Thickness	Collector_1	S355J2G3	NA	Collector_2	S355J2G3	NA	
Component/Joint	Material	Thickness										
Collector_1	S355J2G3	NA										
Collector_2	S355J2G3	NA										
Etapa 4 – Welding Process #2	Etapa 4 – Welding Process #3	Etapa 9 – Solution Parameter										

Os parâmetros de soldadura, Tabela 35, são exactamente os mesmos para o caso de

estudo 2D, de forma a se obter uma primeira aproximação para as dimensões do cordão de soldadura pretendidas.

Tabela 36 - Etapa 5 assistente de soldadura

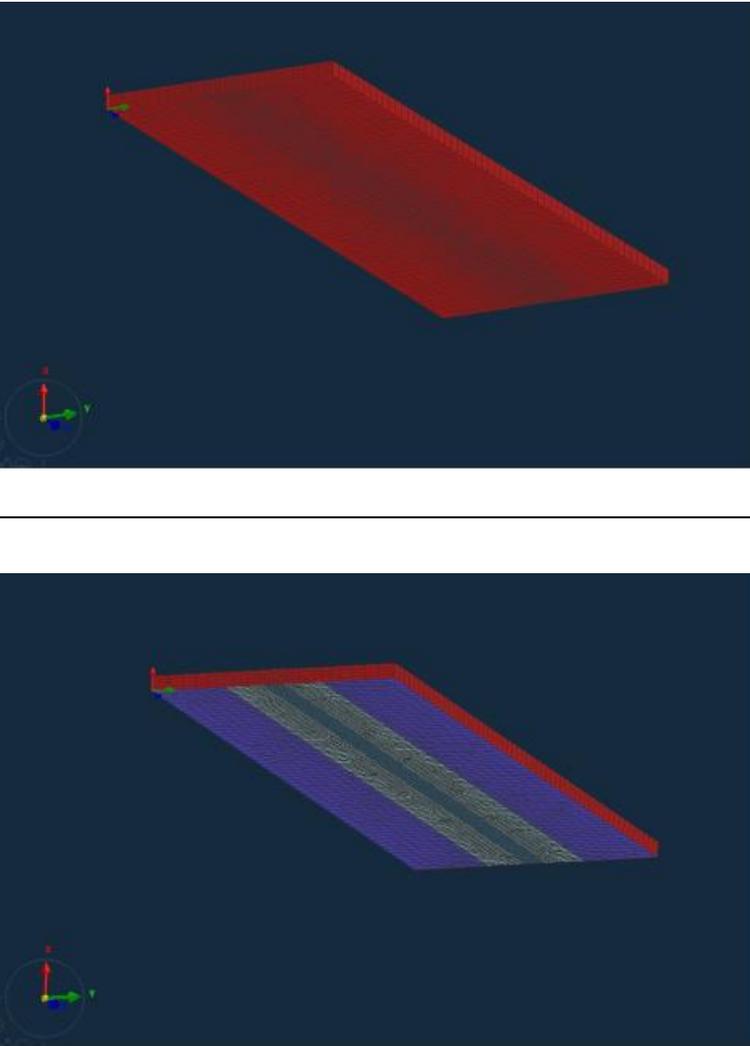
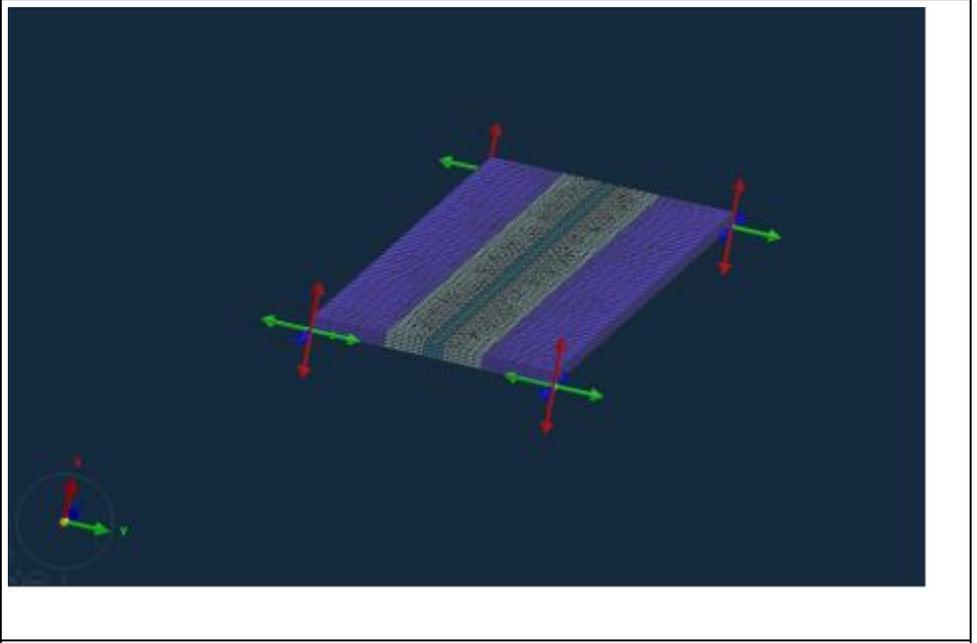
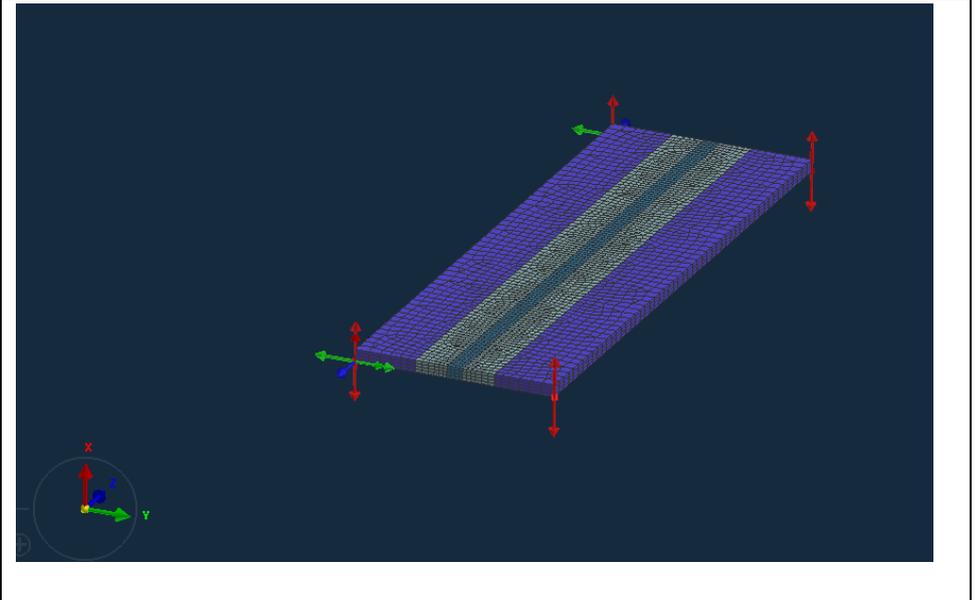
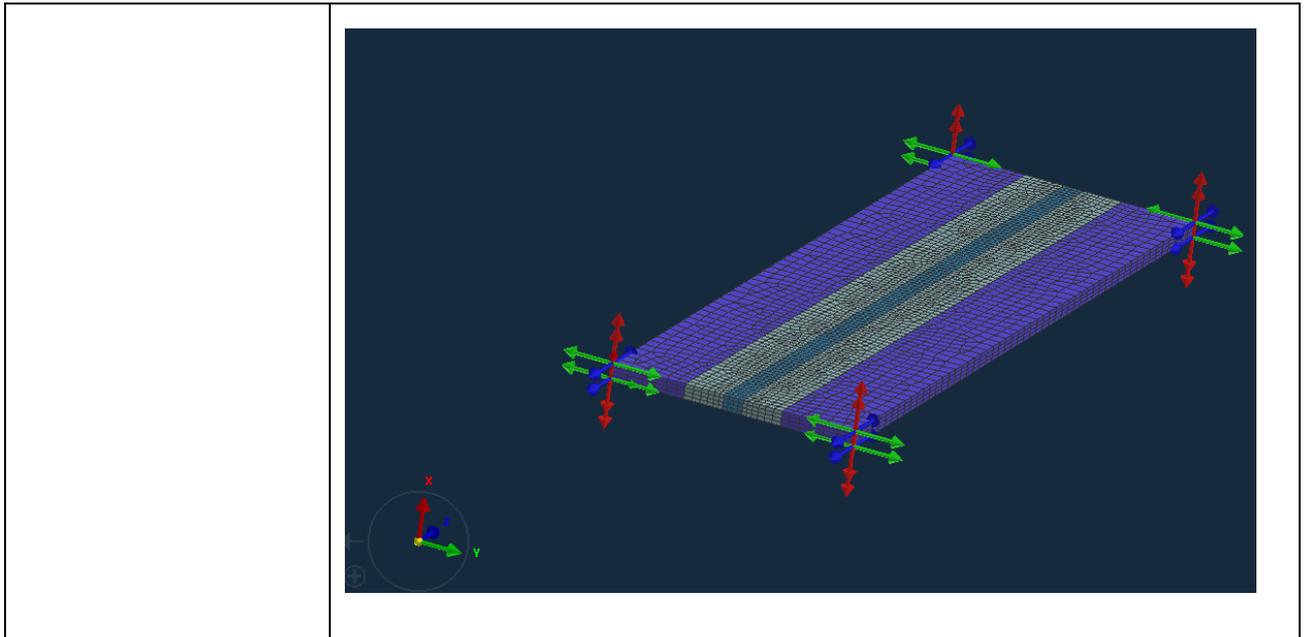
Etapa 5 – Cooling Condition	Área de transferência de calor 1 e 2
	

Tabela 37 - Etapa 6 assistente de soldadura

<p>Etapa 6 – Clamping Condition</p>	<p>Condições de fixação 1, 2 e 3</p>
	
	



As condições de fixação escolhidas são as mesmas aplicadas no caso de estudo 2D, embora neste caso aplicado aos vértices das duas faces de menor área, Tabela 37. As mesmas ficam aplicadas na peça durante 60 segundos (desde o início da formação do cordão de soldadura).

4.2.3 Processamento do modelo

O processamento do modelo 3D será em tudo semelhante ao processamento do modelo 2D, sendo feito em modo *32bits*. O tempo de processamento, devido à extensa malha de método dos elementos finitos, será bastante superior ao do caso de estudo 2D.

4.2.4 Pós Processamento. Visual Viewer / Resultados

Dos ficheiros disponíveis no ficheiro *03_RESU*, serão invocados os campos de interesse para a análise. Estes serão basicamente os mesmos realizados para o caso de estudo 2D, ficando as alterações reservadas para a análise térmica, com a introdução da comparação entre duas áreas de transferência de calor diferentes.

Ao invés de ser apenas analisada uma secção de corte (caso de estudo 2D), serão analisados valores para mais duas secções de corte ao longo da placa, bem como para a secção de corte coincidente com a face da placa que entrará primeiro em contacto com a soldadura. As secções de corte mais convenientes serão escolhidas para cada análise, não sendo garantida a utilização de todas em simultâneo.

Apenas nos ficheiros *V_POST* se poderão escolher os grupos para análise de resultados, desta forma, os estudos envolvendo secções de corte a meio da placa serão tidos com base nesses ficheiros.

4.2.4.1 Análise térmica

Os caminhos escolhidos para a extração dos valores dos campos térmicos ao longo da largura da placa (Y) estão dispostos na Figura 178.

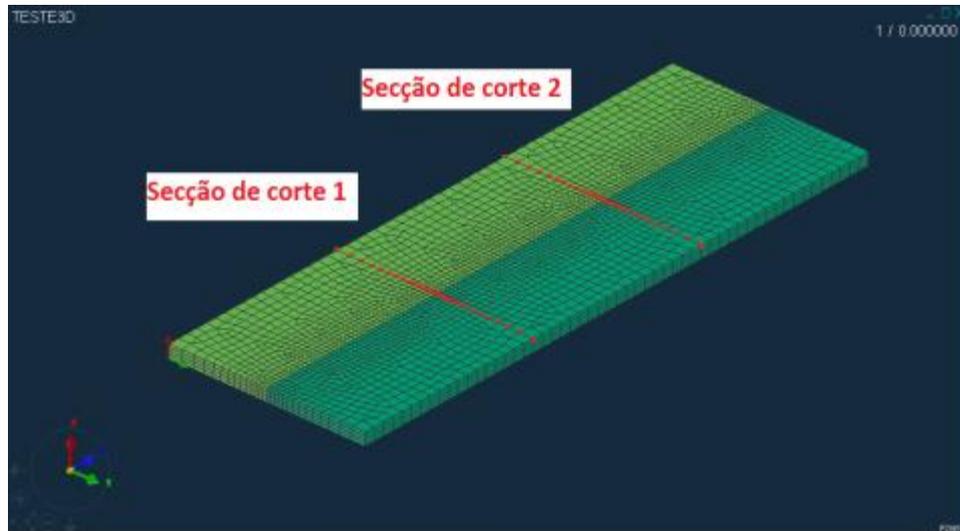


Figura 178 - Secções de corte ao longo do comprimento da placa

Estes caminhos são ilustrativos das duas secções de corte mencionadas anteriormente. Para a elaboração dos gráficos do campo térmico em função da largura da placa, para o instante de penetração máxima, serão escolhidos mais caminhos ao longo da espessura, na superfície de corte.

Calibração do cordão de soldadura

Utilizando como primeira aproximação os parâmetros do modelo de soldadura do caso de estudo 2D, obtiveram-se os campos térmicos para as duas secções de corte ao longo da placa. O modelo para calibração do cordão de soldadura considerado envolve a área de transferência de calor 1, Tabela 36.

Tabela 38 - Campos térmicos para o instante de penetração máxima, com parâmetros de soldadura do caso 2D

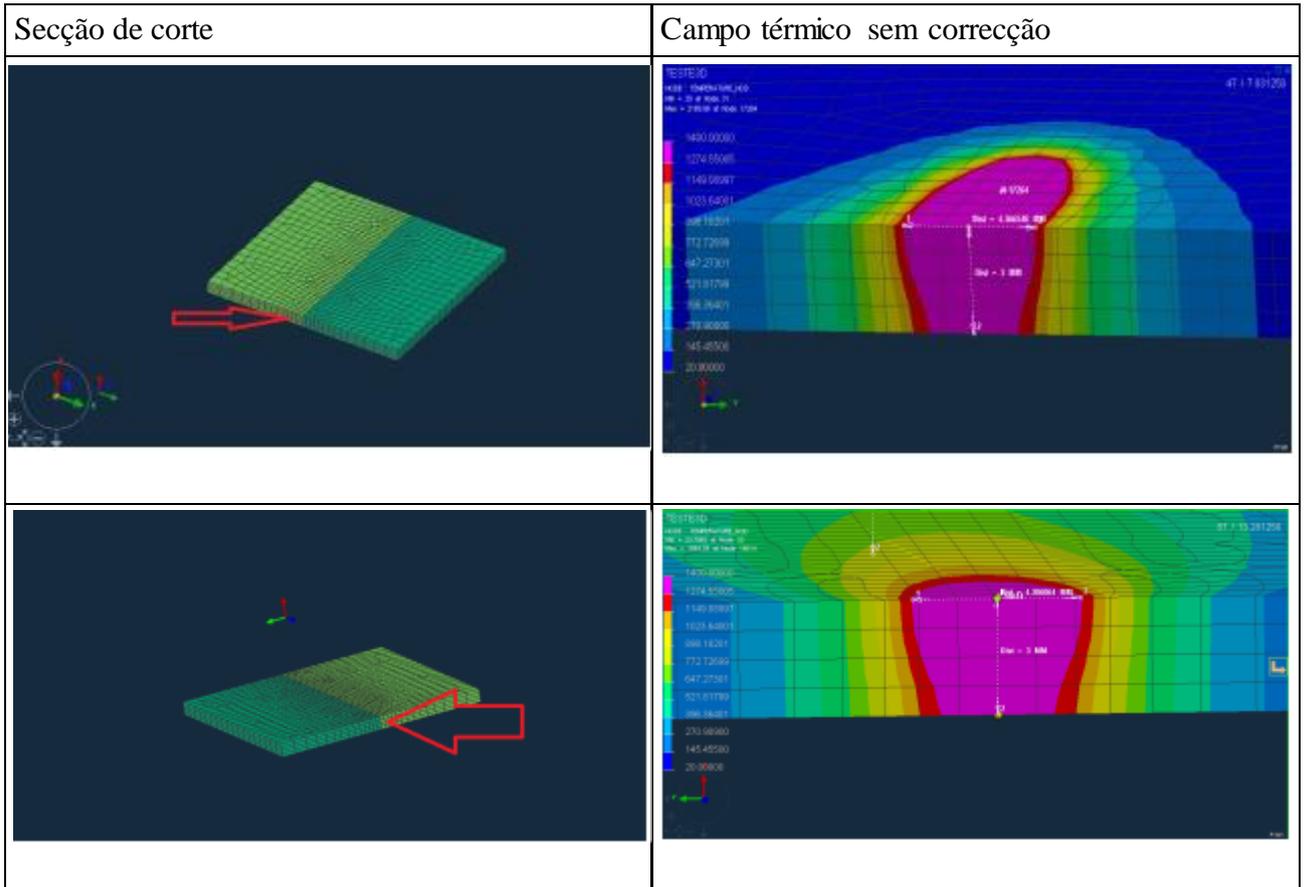
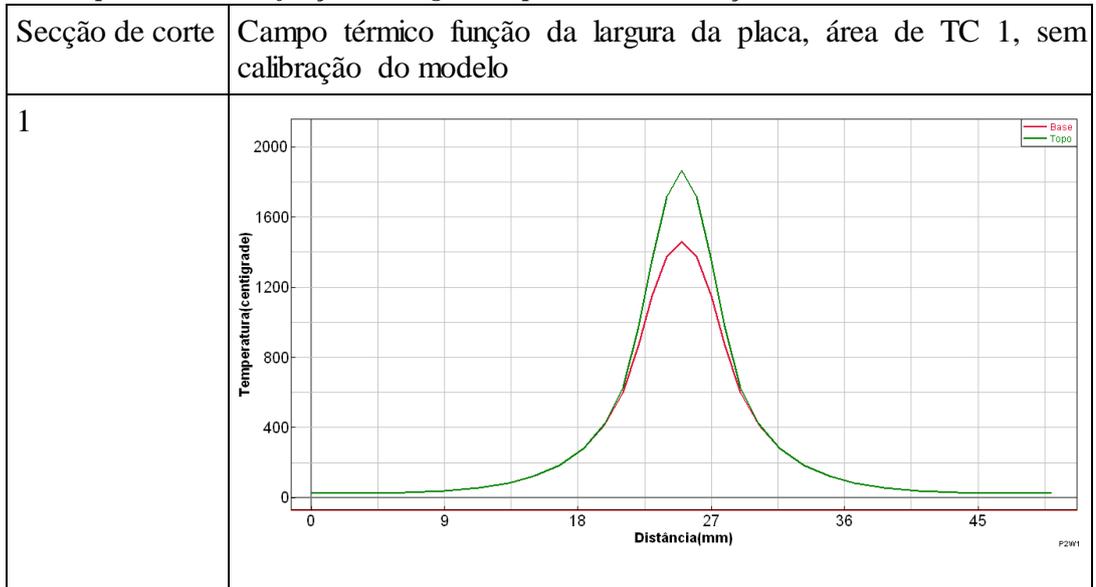


Tabela 39 - Campos térmicos em função da largura da placa. Sem calibração do modelo.



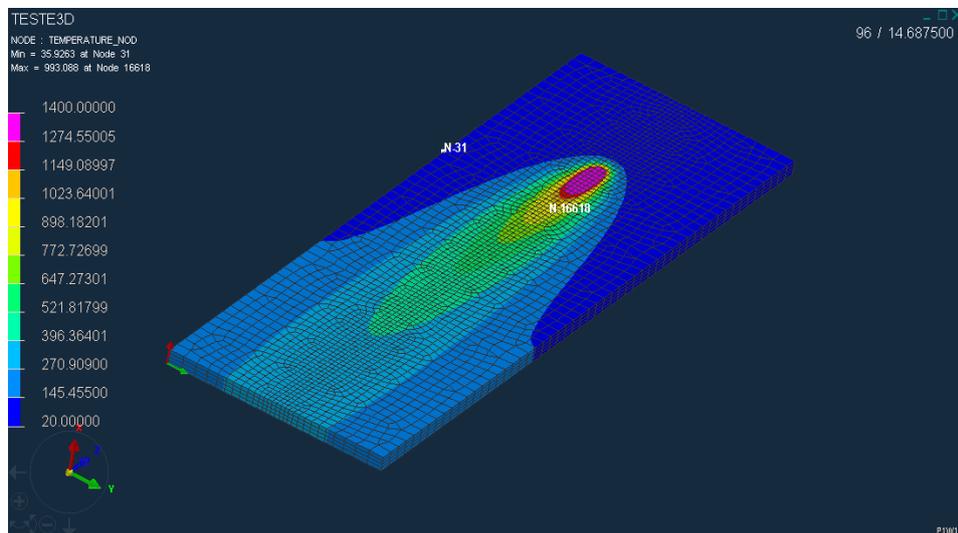
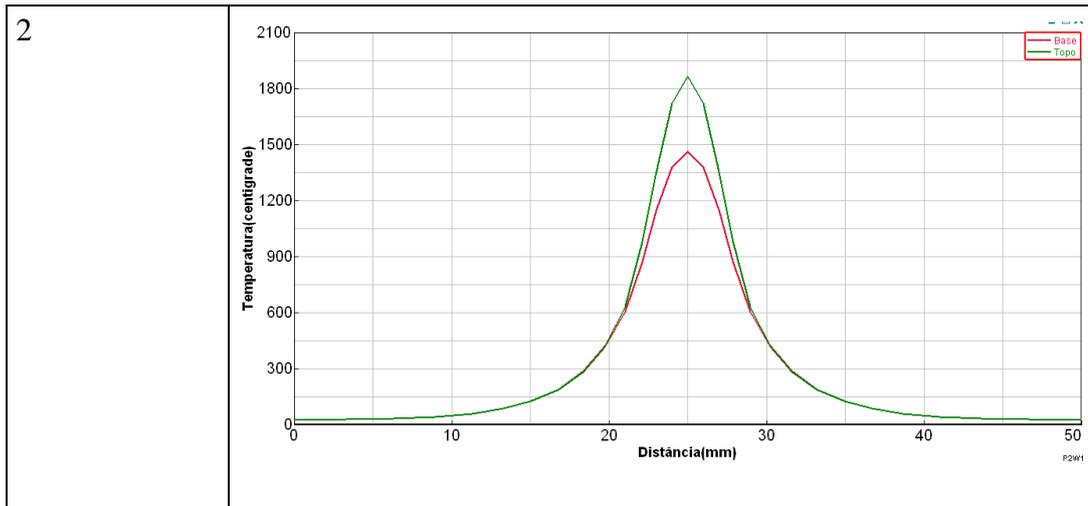


Figura 179 - Campo térmico no topo da chapa num instante durante a realização da soldadura

Como é visível nos campos térmicos obtidos para o instante de penetração máxima em regime estacionário (nas secções de corte traçadas ao longo da peça), Tabela 38, existe uma penetração total da zona fundida, o que evidencia um excesso de calor no processo de soldadura. De forma a ser possível fazer uma comparação entre o modelo 2D e o 3D, as dimensões do cordão de soldadura deverão ser semelhantes, daí ser necessário proceder à calibração do modelo 3D.

Alterando-se as propriedades do processo de soldadura, mantendo o valor da energia por unidade de comprimento a 280 J/mm, foi necessário de forma iterativa reduzir quer o rendimento do processo, quer a penetração do duplo-elipsóide do arco-eléctrico.

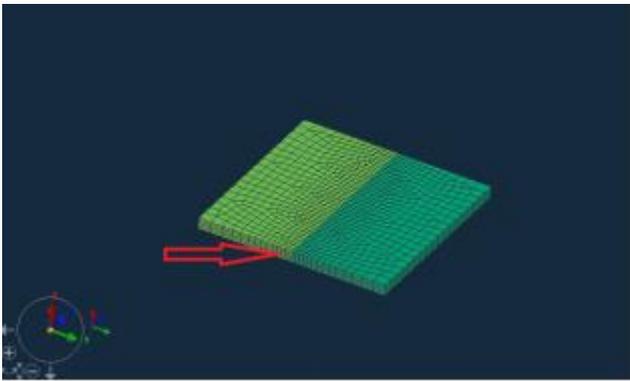
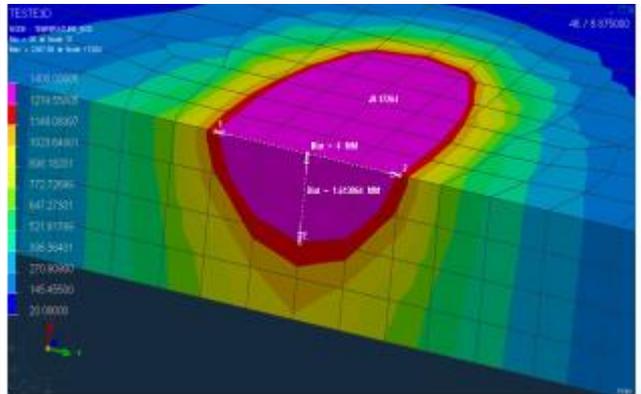
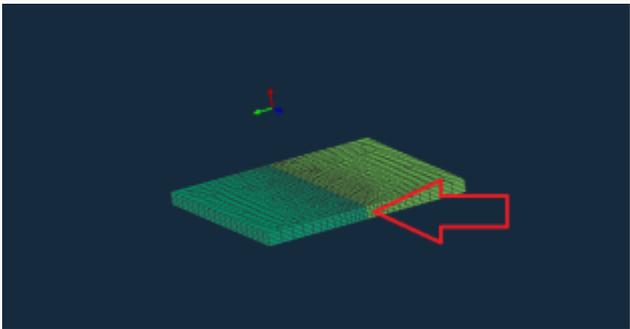
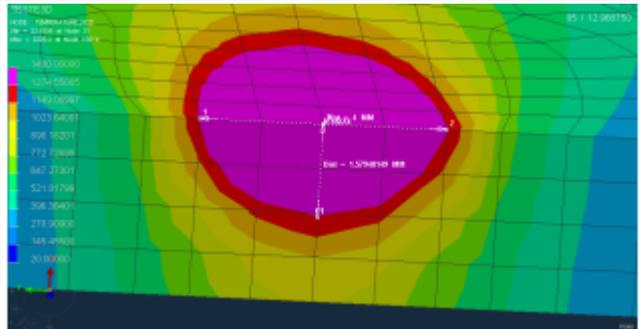
Parâmetros finais utilizados:

- Energia por unidade de comprimento: 280 J/mm
- Rendimento do processo: 56%
- Extensão do duplo-elipsóide: 8 mm

- Largura do duplo-elipsóide: 4 mm
- Penetração do duplo-elipsóide: 0,1 mm

O valor escolhido para a penetração do arco-elétrico teve de ser diminuído de forma a se conseguir uma aproximação quer da largura da região fundida à superfície (4 mm), quer uma penetração máxima de cerca de 1,5 mm. De outras iterações mantendo o valor da penetração a 1,5 mm, reduzindo apenas a eficiência do processo, para um valor de penetração máxima de 1,5 mm, a largura da região fundida à superfície seria inferior aos 4 mm desejados. Esta foi portanto a forma encontrada de satisfazer as necessidades de equilíbrio das dimensões de soldadura entre os dois modelos do caso de estudo.

Tabela 40 - Campos térmicos no instante de penetração máxima para as duas secções de corte. Com calibração do modelo.

Secção de corte	Campo térmico com calibração
	
	

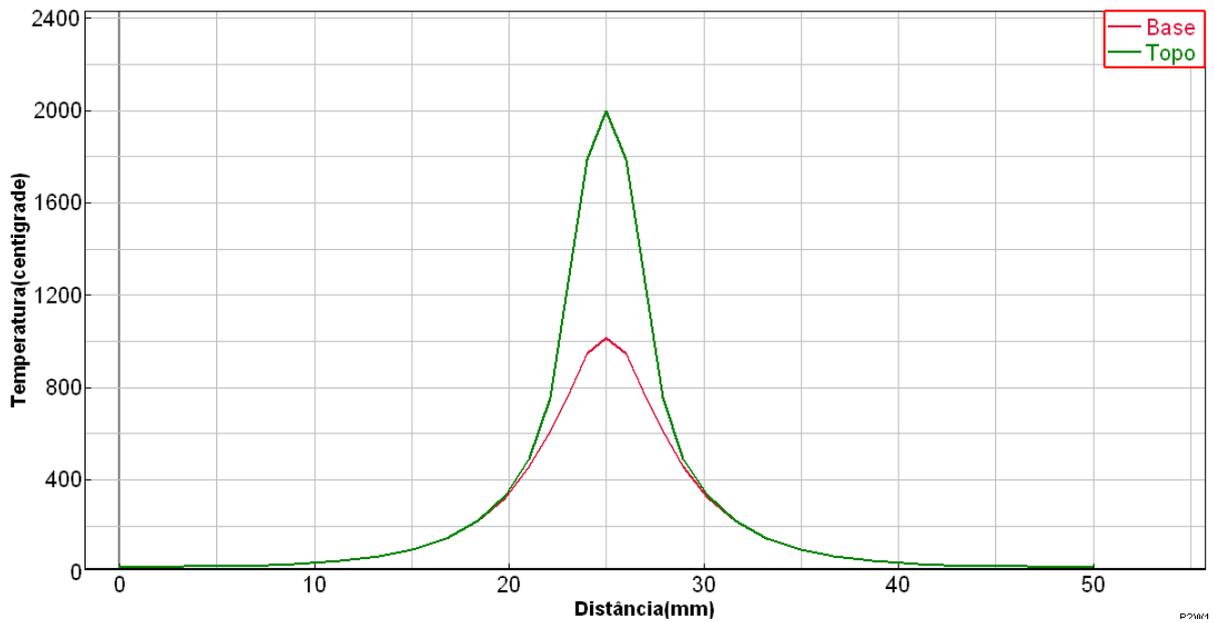


Figura 180 - Distribuição de temperaturas no topo e na base da placa ao longo da largura desta, para o instante de penetração máxima. Modelo calibrado.

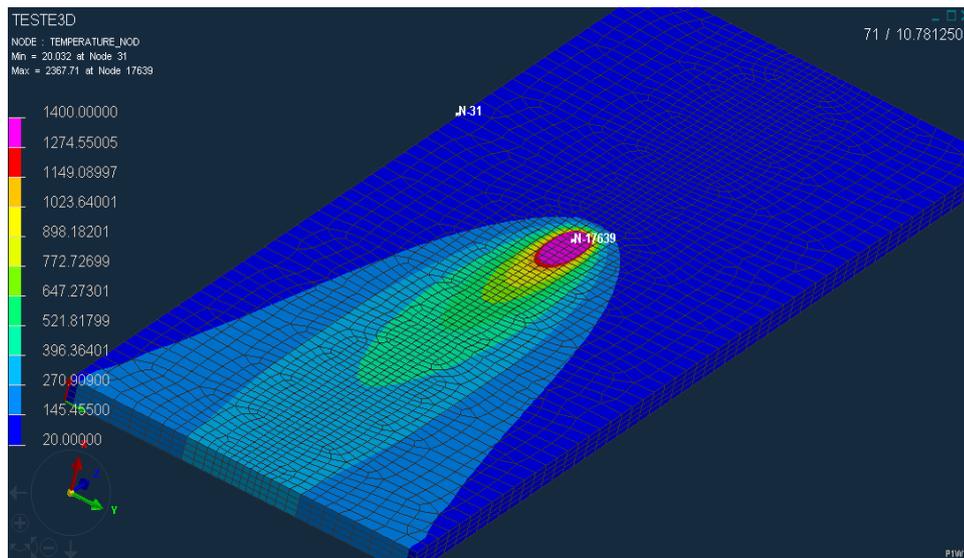


Figura 181 - Campo térmico no topo da placa durante o processo de soldadura. Modelo calibrado.

Da Tabela 40, Figura 180, Figura 181 e por comparação com a mesma análise efetuada no caso de estudo 2D, após calibração do cordão de soldadura, é possível verificar que o perfil de temperaturas para o instante de penetração máxima, ao longo da largura da placa, é semelhante para a base nos dois modelos e mais cerca de 200°C inferior no topo da placa para o caso de estudo 3D (ver Figura 137, Figura 138).

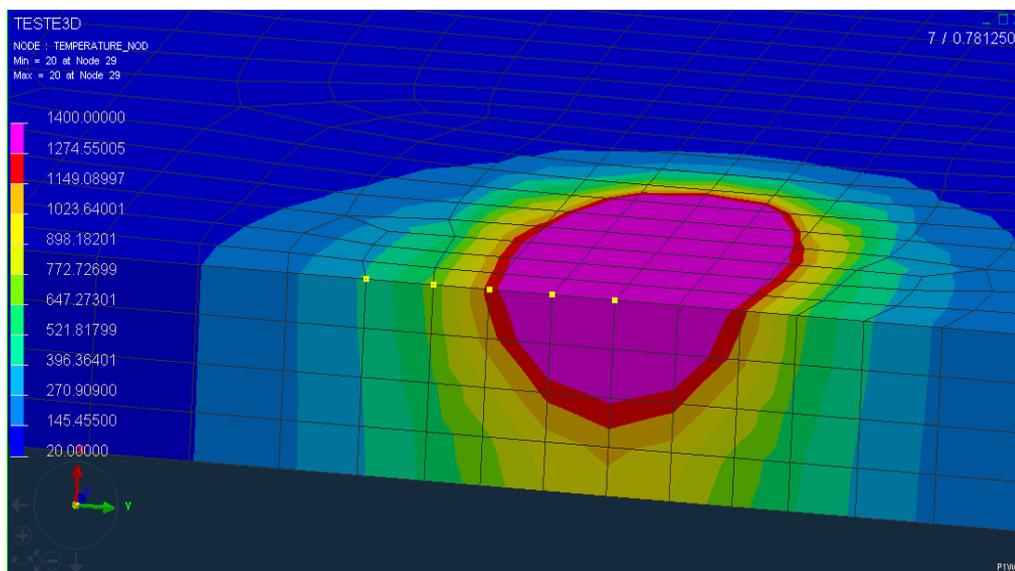


Figura 182 - Nós escolhidos para realizar a análise temporal das temperaturas nodais

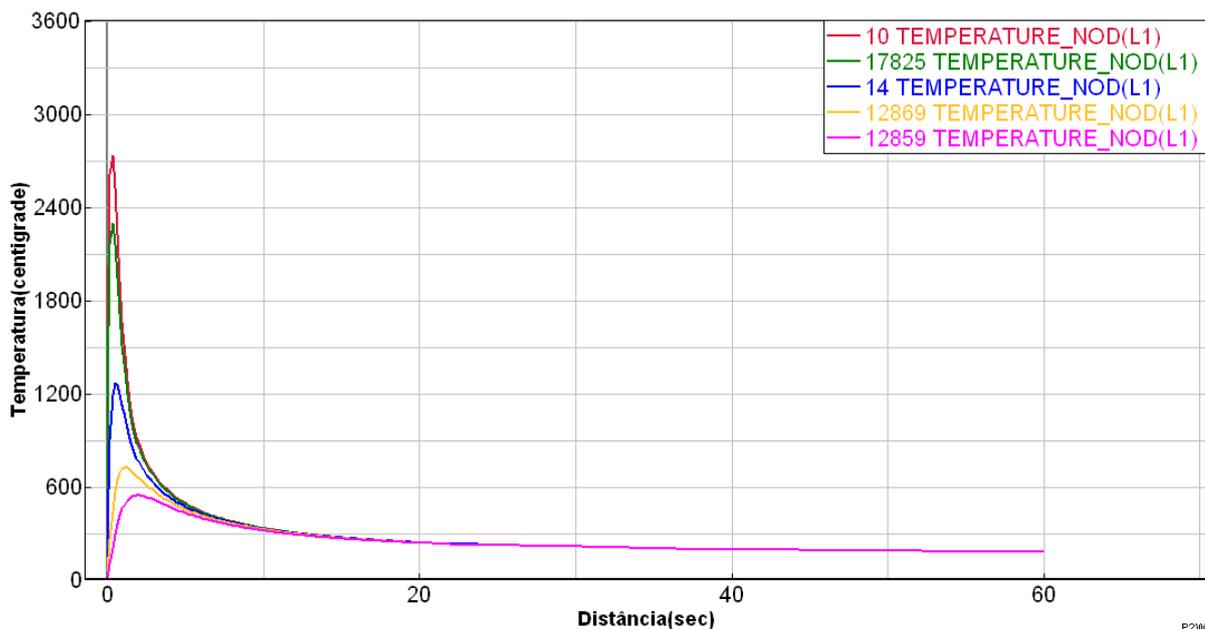


Figura 183 - Variação temporal da temperatura dos nós escolhidos

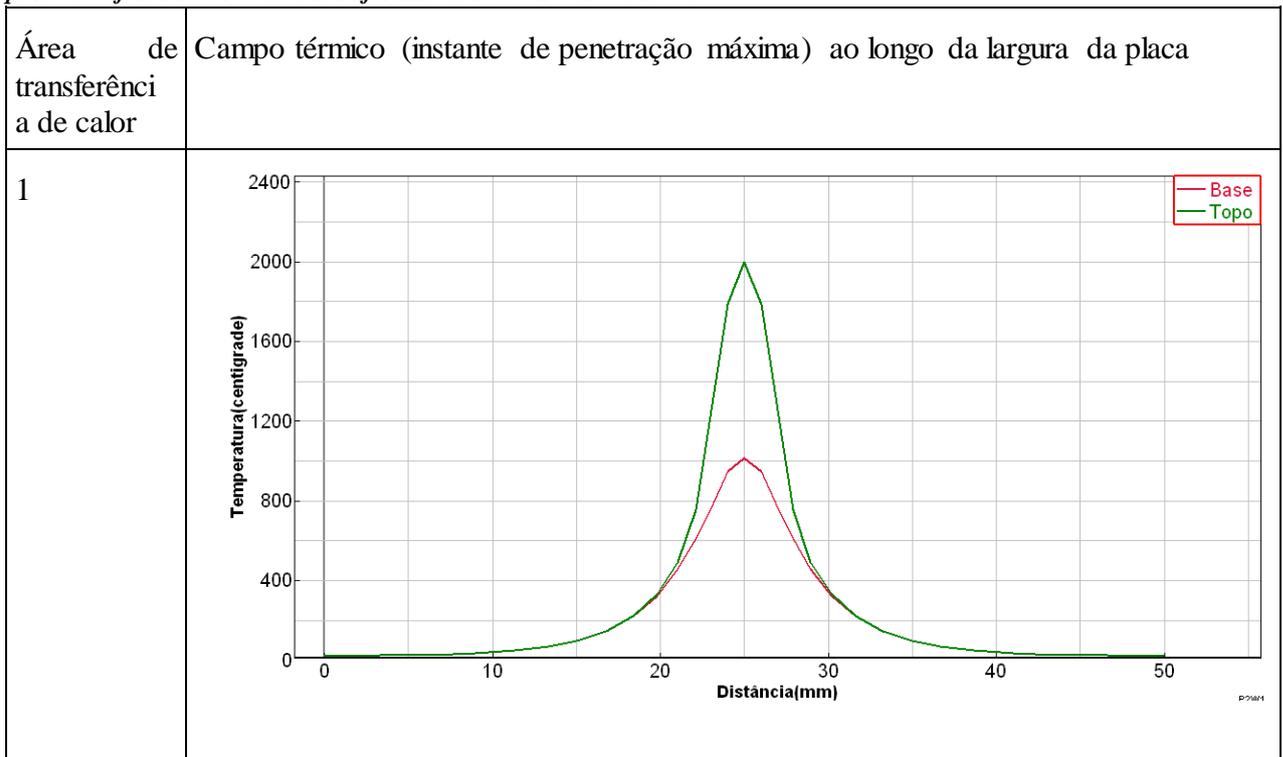
No gráfico da Figura 183, não se podem extrair comparações directas com o modelo 2D, Figura 132, já que devido às diferenças existentes a nível da malha de MEF e da área de transferência de calor, os pontos seleccionados para a análise estarão distanciados de forma diferente uns dos outros relativamente à linha do centro da soldadura.

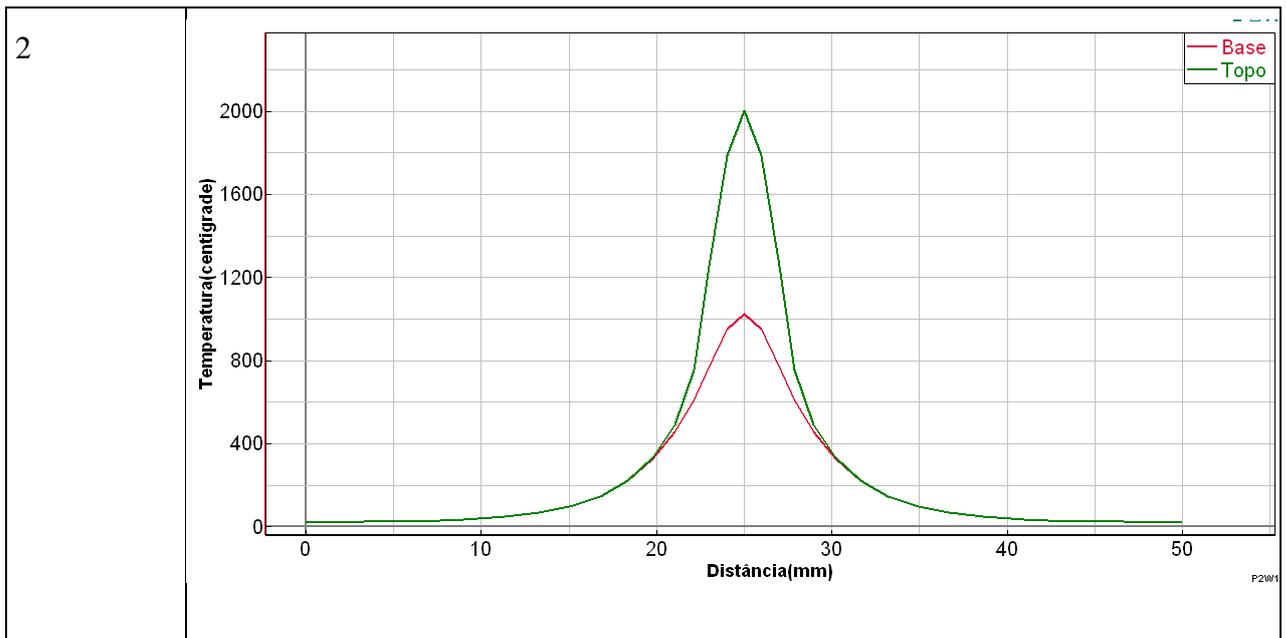
Conclui-se portanto para além da correcta implementação do modelo em *Sysweld*, a temperatura na secção de corte correspondente à face da placa onde se iniciará a soldadura estará à temperatura ambiente a partir do segundo 40 sensivelmente.

Comparação dos campos térmicos para os dois casos de áreas de transferência de calor

Para valores semelhantes do processo de soldadura, procurou-se verificar quais as consequências em não considerar a área da base como envolvente no processo de transferência de calor por convecção. Obtiveram-se para tal, os campos térmicos (topo e base) ao longo da largura da placa, para a secção de corte 1, Figura 178.

Tabela 41 - Distribuição ao longo da largura da placa das temperaturas no instante máximo de penetração para as diferentes áreas de transferência de calor consideradas





Da Tabela 41 se conclui que não existem diferenças relevantes entre a distribuição de temperaturas ao longo da largura da placa para os dois casos de áreas de transferência de calor considerados.

4.2.4.2 Análise metalúrgica

As alterações das fases químicas provocadas pela soldadura serão analisadas na secção de corte correspondente à face da chapa que entrará primeiro em contacto com a mesma. Aí é escolhido um elemento 3D, Figura 184, junto à linha de centro do cordão de soldadura para se extraírem as variações das suas fases químicas ao longo do intervalo de tempo do processo de soldadura.

A Tabela 42 da distribuição da fase química é referente ao instante final do processo de soldadura, sendo o momento de interesse pois conhecer-se-ão as propriedades químicas do material final. As variações de fase química ao longo do processo de soldadura, Figura 185, são referentes ao elemento 3D da Figura 184.

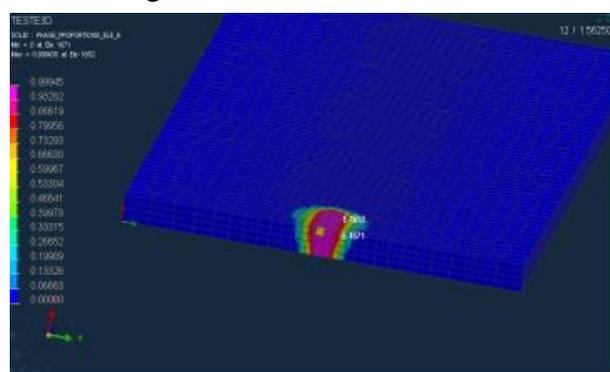
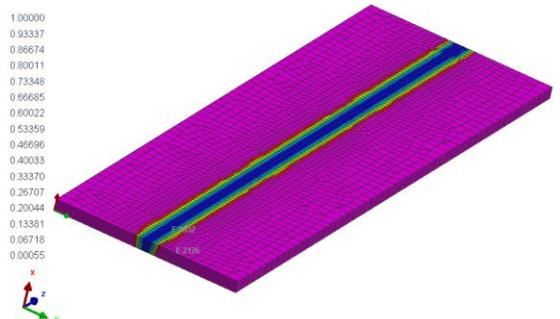
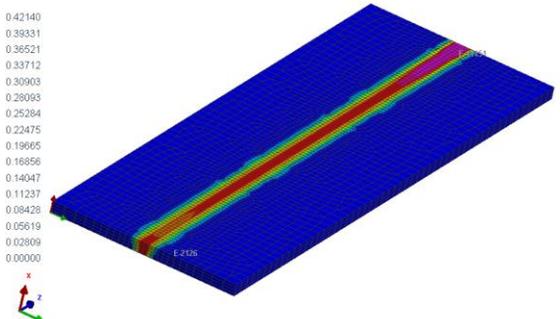
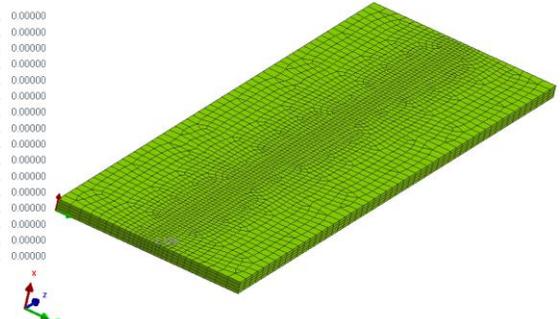
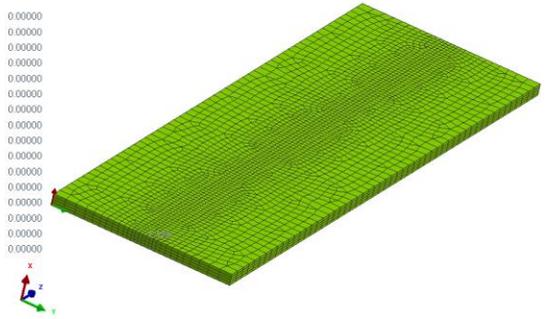
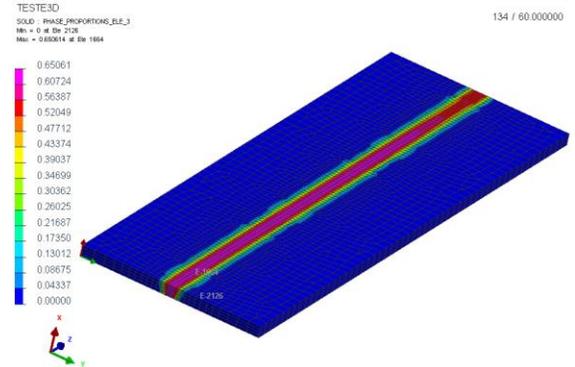


Figura 184 - Elemento 3D seleccionado para análise das proporções de fase química

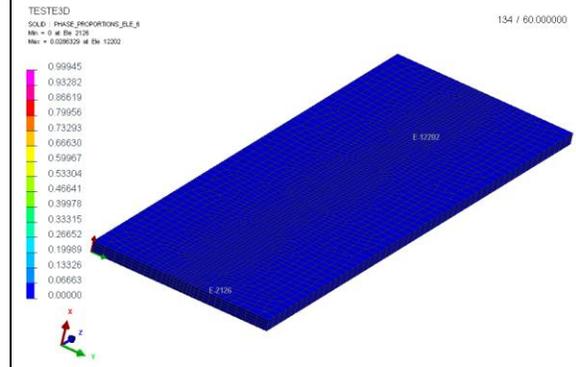
Tabela 42 - Proporções das fases químicas para o instante final de soldadura

Fase	Distribuição de fase	Fase	Distribuição de fase
1 – Ferrite/ Perlite	<p>TESTE3D SOLID : PHASE_PROPORTIONS_ELE_3 Min = 0.00055 at Ele 11451 Max = 1 at Ele 2126</p> 	4 - Bainite	<p>TESTE3D SOLID : PHASE_PROPORTIONS_ELE_4 Min = 0 at Ele 2126 Max = 0.42140 at Ele 11451</p> 
2 – Material de adição.	<p>TESTE3D SOLID : PHASE_PROPORTIONS_ELE_2 Min = 0 at Ele 1596 Max = 0 at Ele 1596</p> 	5 Martensite temperada	<p>TESTE3D SOLID : PHASE_PROPORTIONS_ELE_5 Min = 0 at Ele 1596 Max = 0 at Ele 1596</p> 

3 - Martensite



6 - Austenite



O espectro apresenta os valores referentes à proporção de cada fase química, sendo a cor azul indicadora da ausência dessa mesma fase.

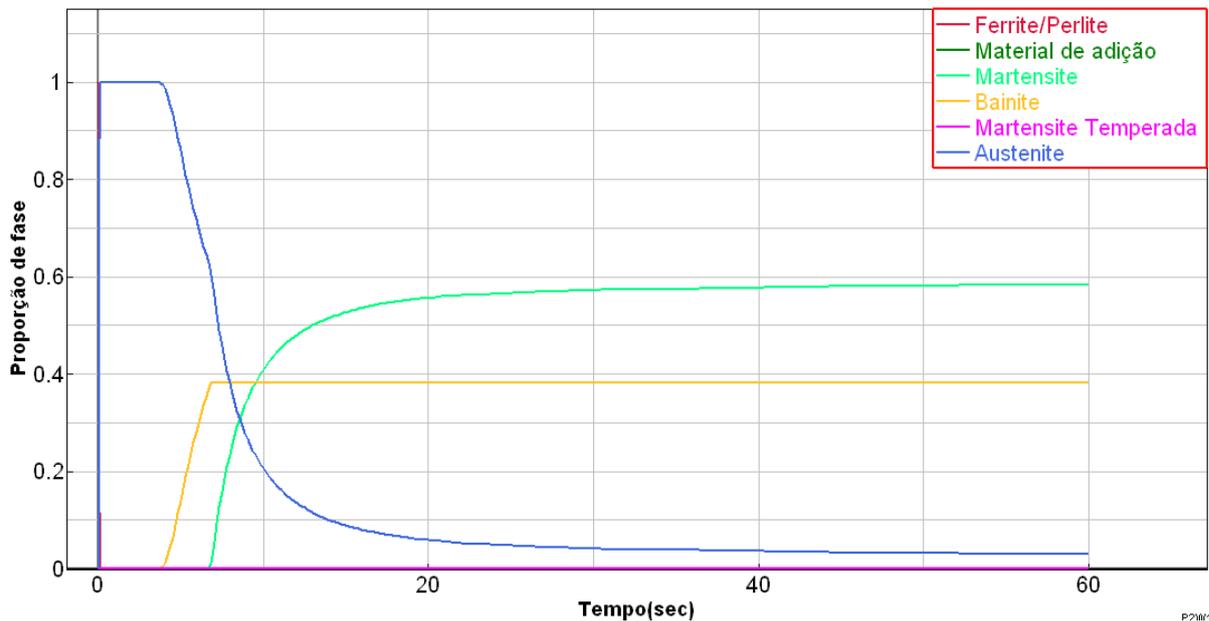


Figura 185 - Variação das fases químicas ao longo do tempo de soldadura

Recordando a legenda:

- Vermelho: ferrite/ perlite e material inicial;
- Verde escuro: material de adição (não visível já que se encontra na linha de abcissa nula);
- Verde claro: martensite;
- Amarelo: bainite;
- Rosa: martensite temperada;
- Azul: austenite;

Comparativamente com o caso 2D, Figura 142, neste modelo a proporção de martensite é superior no final do processo, sendo a proporção de bainite inferior. Estas duas proporções estão dependentes da diminuição da percentagem de austenite na peça, que ocorre de forma semelhante ao verificado no caso 2D.

Estas diferenças devem-se à diferente área de transferência de calor, bem como à condução existente devido à maior proporção de material existente no caso de estudo 3D, já que o valor das temperaturas na região do elemento (como comprovado na análise térmica), pouco difere entre modelos.

4.2.4.3 Análise de distorções e distorções

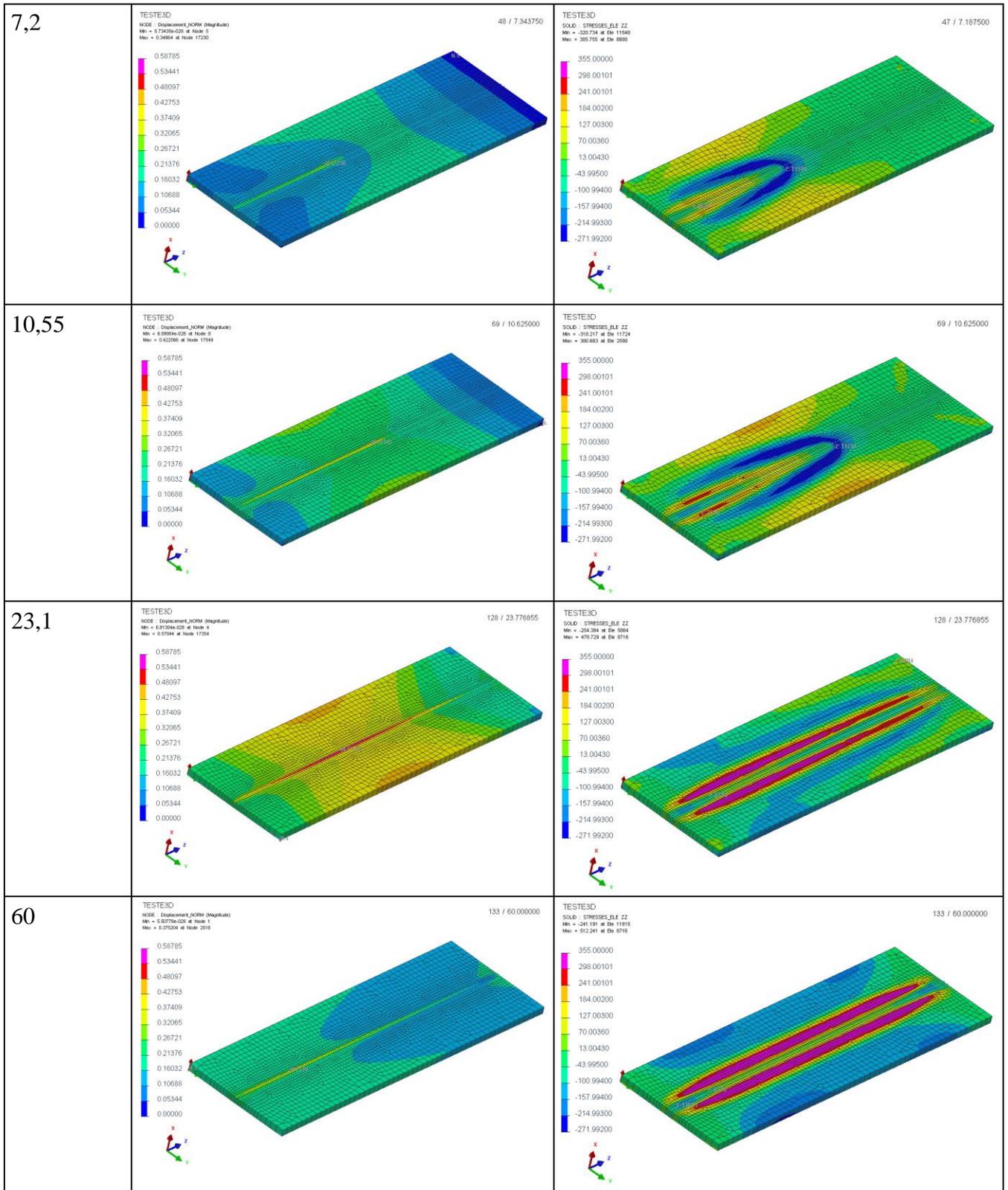
Em termos de espectro de resultados, o mesmo é limitado à tensão de cedência do aço S355J2G3 (355MPa) e 11 níveis de tensão, Figura 144, estando as zonas com a cor do nível máximo do espectro deformadas plasticamente.

Ao contrário do que sucedeu no caso de estudo 2D anterior, onde foram visualizadas as respectivas distorções e tensões residuais para uma secção de corte, neste caso serão representadas perspectivas 3D das mesmas.

4.2.4.4 Evolução das distorções vs tensões residuais (condição de fixação 1)

Tabela 43 - Evolução das distorções e tensões residuais ao longo do processo de soldadura

Instante de tempo (s)	Distorções	Tensões residuais zz (MPa)
1,75	<p>TESTE3D NODE : Displacement, JACOBI (Magnitude) Min = 0.044776202 at Node 8 Max = 0.228112 at Node 2455</p> <p>12 / 1.718750</p>	<p>TESTE3D SOLID : STRESS, E, E, ZZ Min = -269.685 at Ete 2096 Max = 165.433 at Ete 3172</p> <p>12 / 1.718750</p>
2,5	<p>TESTE3D NODE : Displacement, JACOBI (Magnitude) Min = 0.207396320 at Node 8 Max = 0.2758412 at Node 2455</p> <p>17 / 2.500000</p>	<p>TESTE3D SOLID : STRESS, E, E, ZZ Min = -281.557 at Ete 2096 Max = 159.297 at Ete 3368</p> <p>17 / 2.500000</p>



Ao longo da evolução temporal da soldadura, Tabela 43, é notória a existência de tensões de tracção (segundo zz) na zona termicamente afectada (assinaladas a vermelho/roxo), ocorrendo plastificação nessas mesmas regiões. Nas zonas periféricas da mesma secção, as tensões são da compressão de forma a ser gerado um equilíbrio.

Relativamente às distorções, a base de comparação com o caso de estudo 2D não é de todo evidente, apesar de se verificar uma simetria ao longo de Z no campo de deformações. É de realçar nesta evolução temporal, a forma da deformada que a chapa apoiada toma segundo o tipo de fixação definido por 1 (vértices inferiores da placa limitando o movimento em todas as direcções, Tabela 19).

4.2.4.5 Representação gráfica das tensões residuais função da largura da peça.

Abrindo o ficheiro *V_POST2000.fdb*, onde é possível separar a placa de acordo com os grupos criados em *Visual Mesh*, são extraídas as tensões residuais da mesma. Os valores das tensões seguidamente apresentadas são as ocorridas no instante final do processo de soldadura.

É feita uma análise das tensões residuais longo de três secções de corte referidas na Figura 186, sendo esta criada para cada condição de fixação a estudar, Tabela 19.

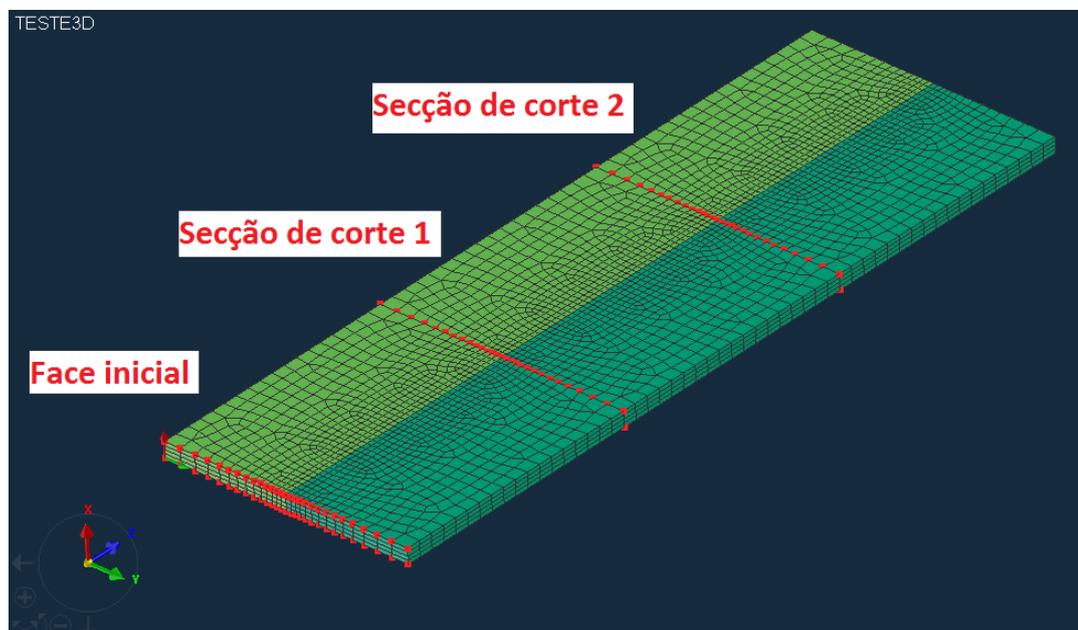


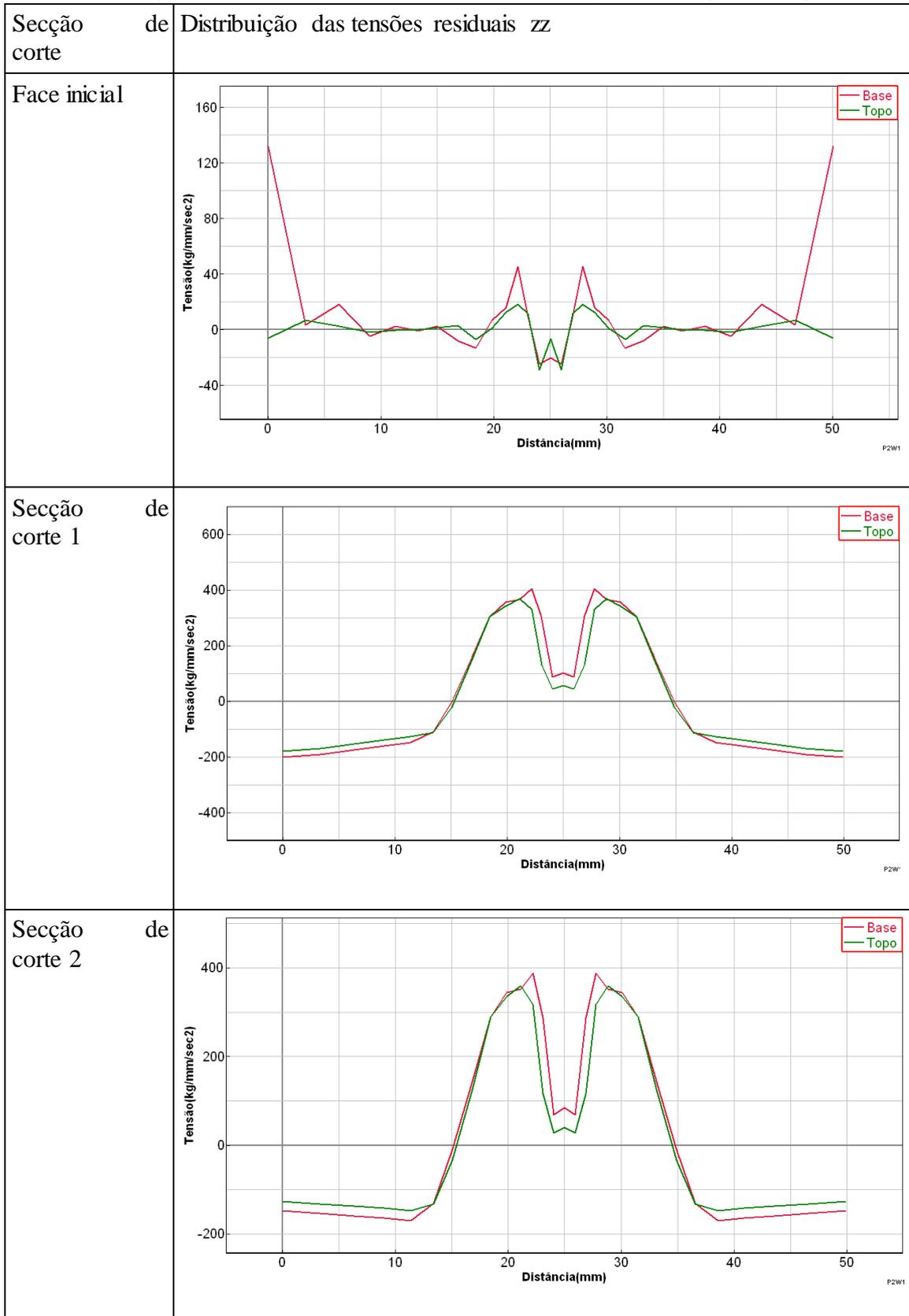
Figura 186 - Secções de corte definidas para análise de tensões residuais

Os valores das tensões residuais na base estão representados a vermelho, sendo os a verde referentes às tensões residuais do topo da placa.

4.2.4.6 Condição de fixação 1.

4.2.4.6.1 Tensões segundo zz

Tabela 44 - Distribuição de tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 1



As tensões residuais segundo zz atingem um pico, na face principal, junto aos vértices inferiores de fixação, graças à limitação em Z existente. Já as mesmas tensões no topo não apresentam valor elevado, devido à liberdade de movimento existente.

Nas secções de corte seguintes da Tabela 44, apesar de escalas de visualização relativamente diferentes, as distribuições das tensões zz são semelhantes, diferindo sobretudo na zona das tensões de compressão, apresentado o seu valor máximo em distâncias diferentes (as da secção de corte 1 máximas na periferia e as da secção de corte 2 máximas junto à zona termicamente afectada).

Comparativamente com o campo de tensões residuais do caso de estudo 2D, tanto o perfil como os valores das tensões apresentam semelhanças, Tabela 24.

4.2.4.6.2 Tensões segundo yy

Tabela 45 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 1

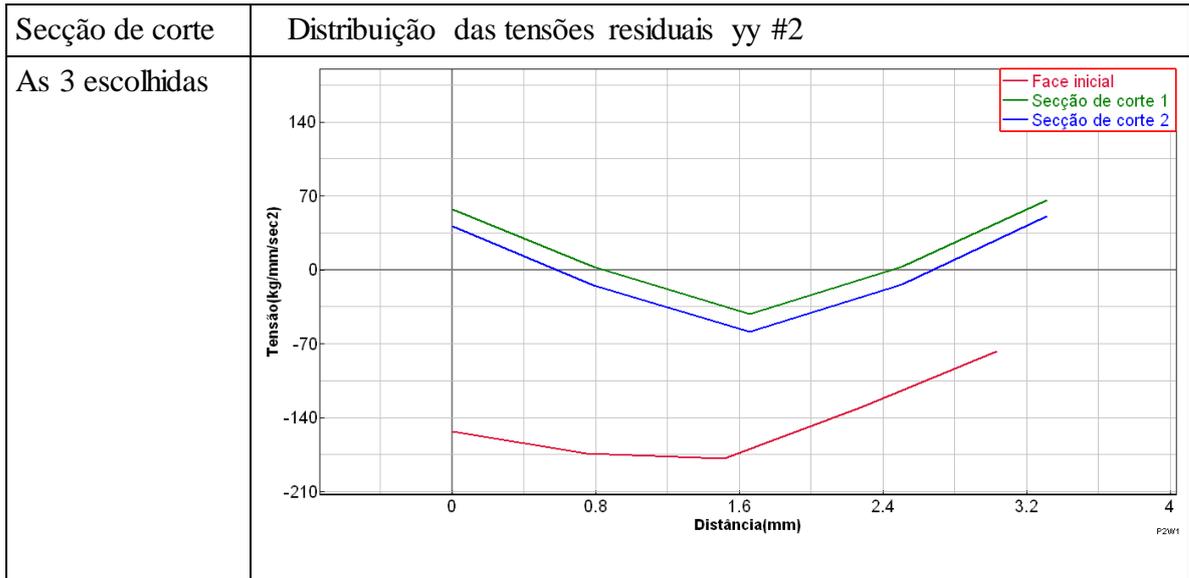
Secção de corte	Distribuição das tensões residuais yy #1
Face inicial	
Secção de corte 1	
Secção de corte 2	

Na face inicial como seria de esperar, as tensões segundo yy atingem os valores mais elevados, já que é nesta secção que estará presente a fixação em Y da chapa. Nas restantes

secções de corte, os valores são parecidos entre si, tendo uma distribuição de tensões com aspecto semelhante.

Em relação ao caso de estudo 2D apenas é possível estabelecer uma relação directa com a face inicial, já que nessa secção de corte as condições de fixação serão as mesmas desse modelo. Em todas as outras secções a comparação não será válida, visto as dimensões da placa e as condições de fixação adoptadas, levarem a tensões residuais de valor muito inferior ao longo de Z.

Tabela 46 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo da espessura da placa, condição de fixação 1

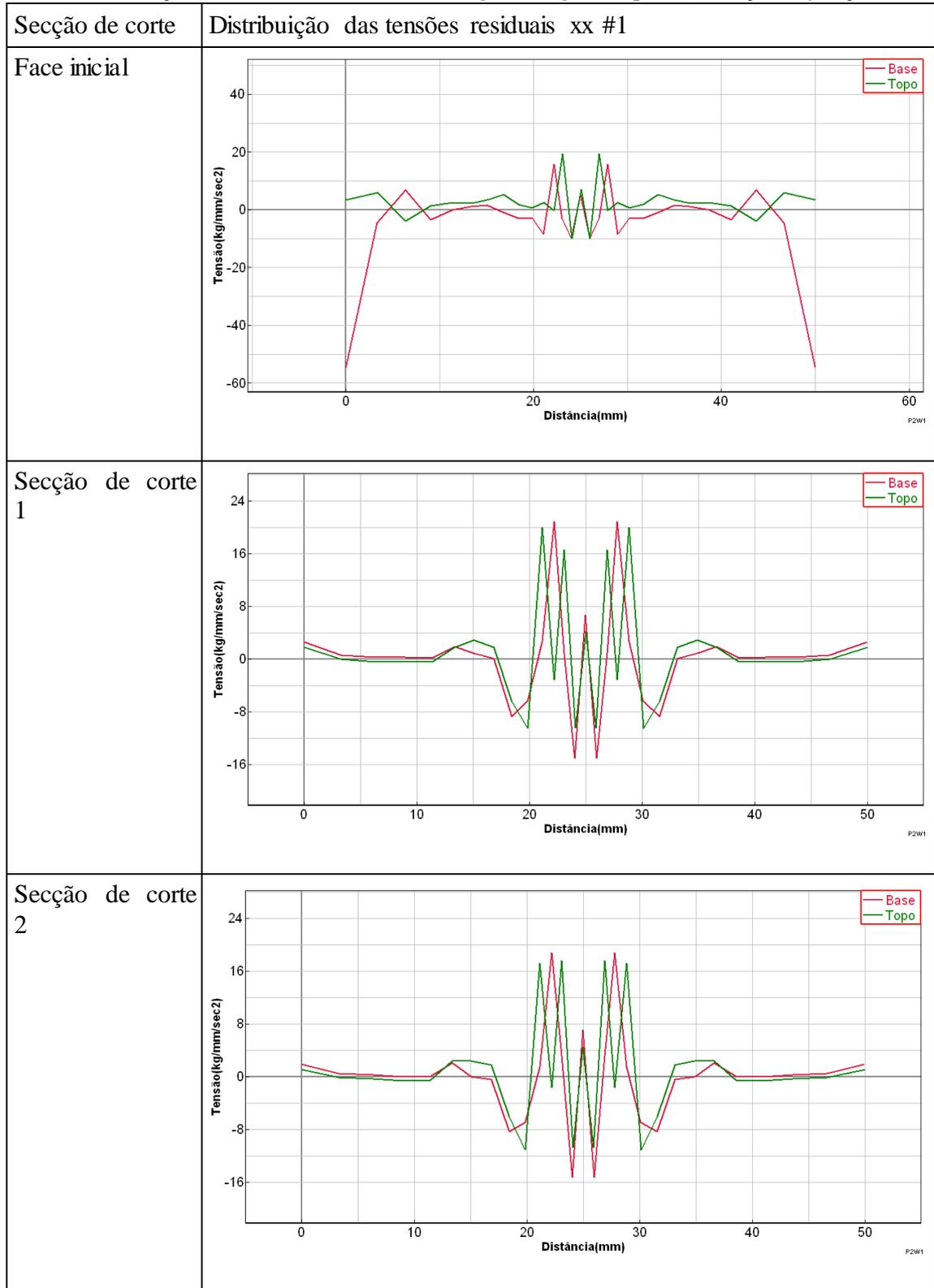


Daqui se conclui que há uma distribuição bem definida das tensões yy ao longo da espessura na secção de corte 1 e 2, sendo a compressão máxima existente a meia espessura.

No caso da face principal como foi visto, no ponto de espessura máxima (base da placa), as tensões serão máximas.

4.2.4.6.3 Tensões segundo xx

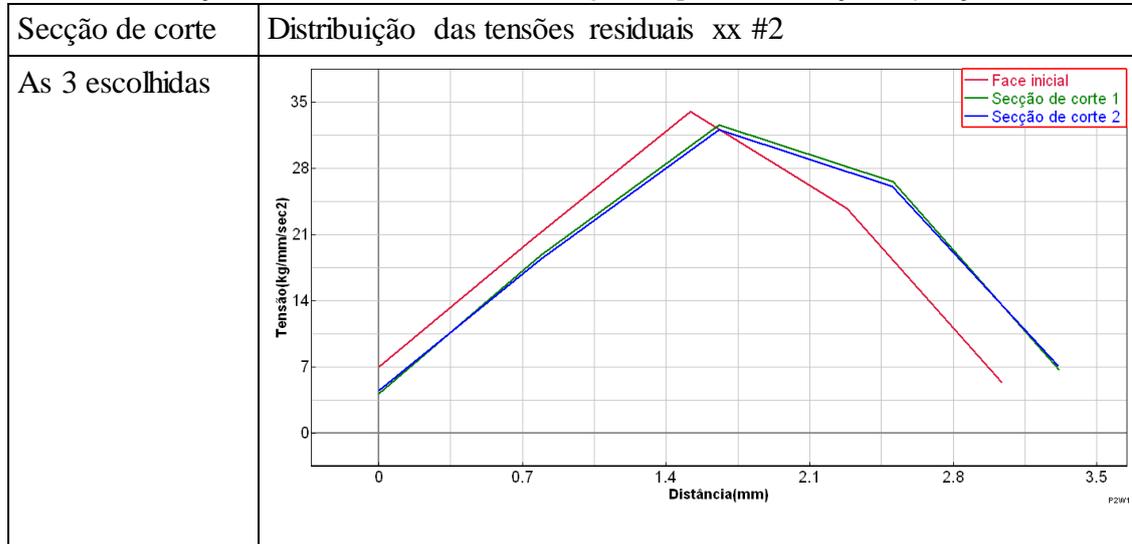
Tabela 47 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 1



À semelhança do que acontece com as tensões residuais yy, para o caso da face inicial, devido às condições de restrição presentes na base, as tensões aí serão maiores (máximo junto

à fronteira). Nos restantes gráficos para estas tensões, resta dizer que são tensões com pouco impacto na peça, tendo valores reduzidos, sendo o máximo destes localizado na zona termicamente afectada (nas secções de corte 1 e 2, Figura 178).

Tabela 48 - Distribuição das tensões residuais xx ao longo da espessura, condição de fixação 1



As variações das tensões residuais xx ao longo da espessura, não tem impacto entre as diferentes tensões de corte consideradas. Apresentam o seu máximo a meia espessura, tendo uma distribuição bem definida, diminuindo a sua magnitude à medida que se aproximam as fronteiras (topo e base).

4.2.4.7 Condição de fixação 2

4.2.4.7.1 Tensões segundo zz

Tabela 49 - Distribuição das tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 2

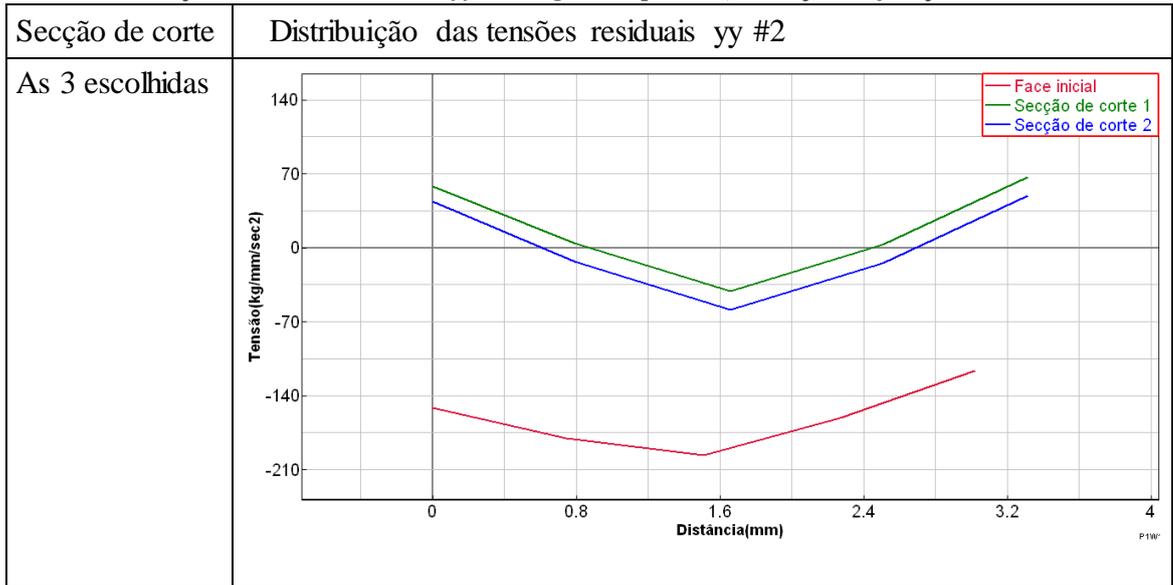
Secção de corte	Distribuição das tensões residuais zz
Face inicial	
Secção de corte 1	
Secção de corte 2	

4.2.4.7.2 Tensões segundo yy

Tabela 50 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 2

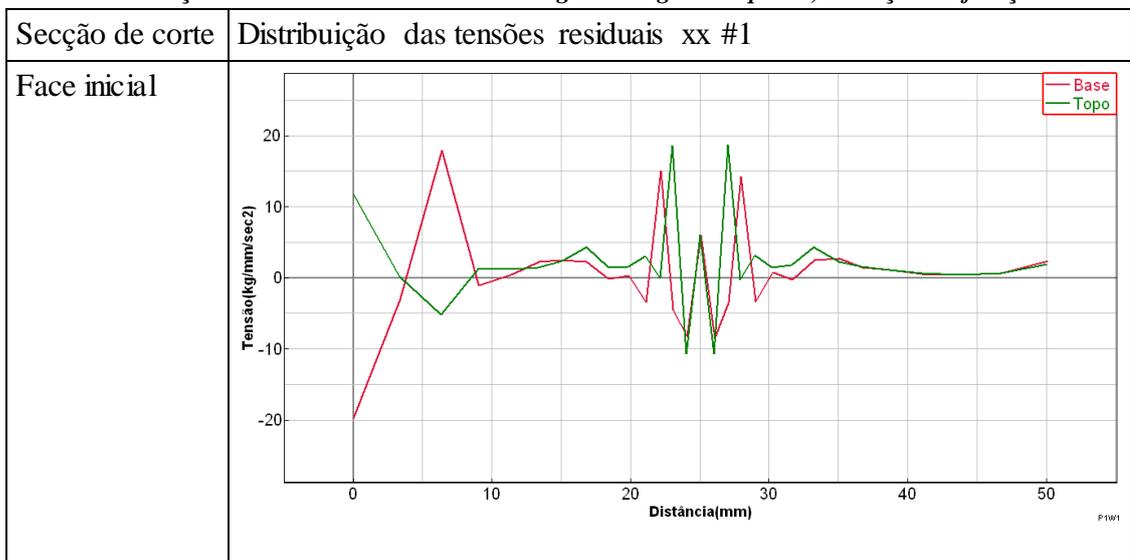
Secção de corte	Distribuição das tensões residuais yy #1
Face inicial	
Secção de corte 1	
Secção de corte 2	

Tabela 51 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da espessura, condição de fixação 2



4.2.4.7.3 Tensões segundo xx

Tabela 52 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 2



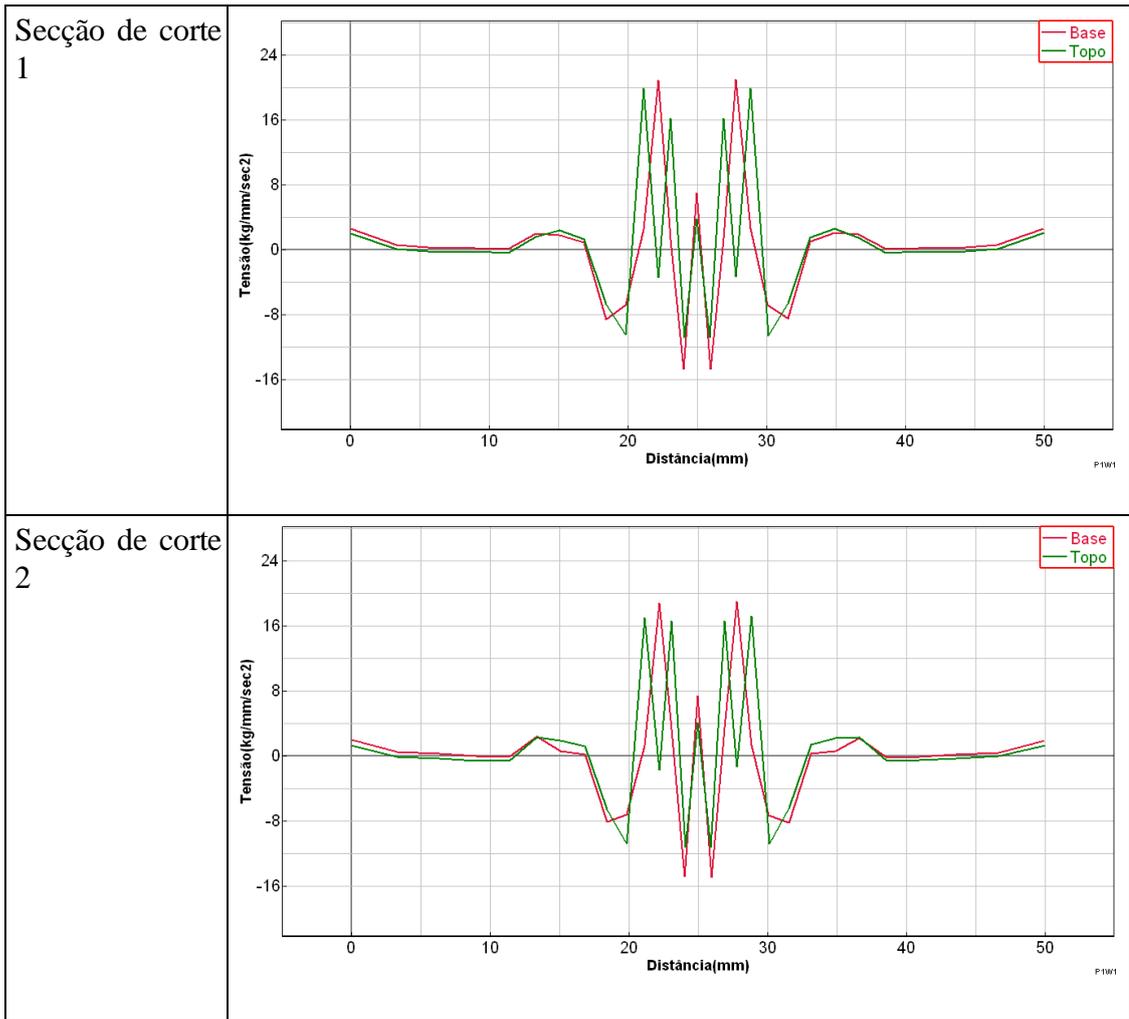
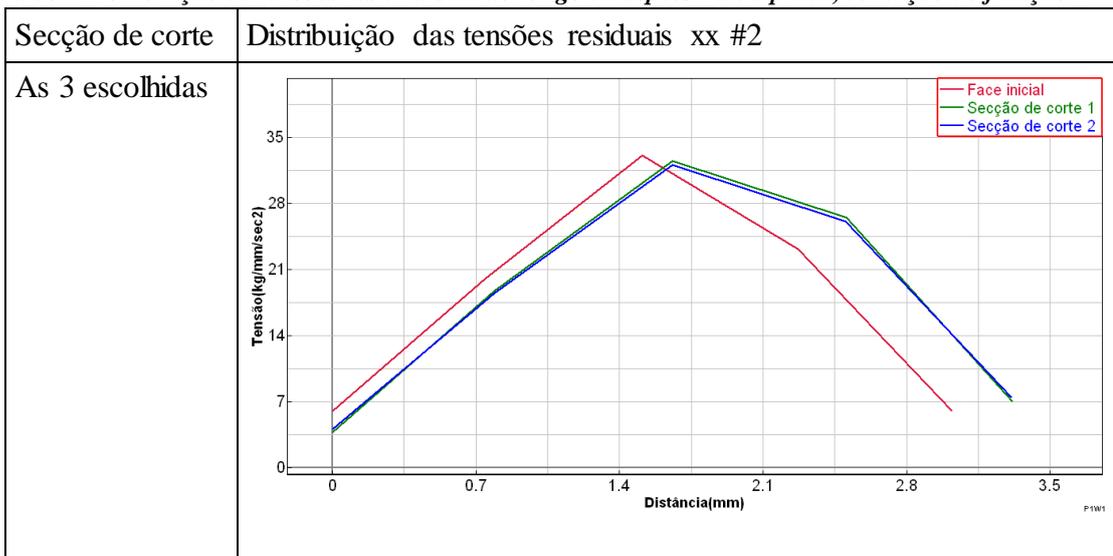


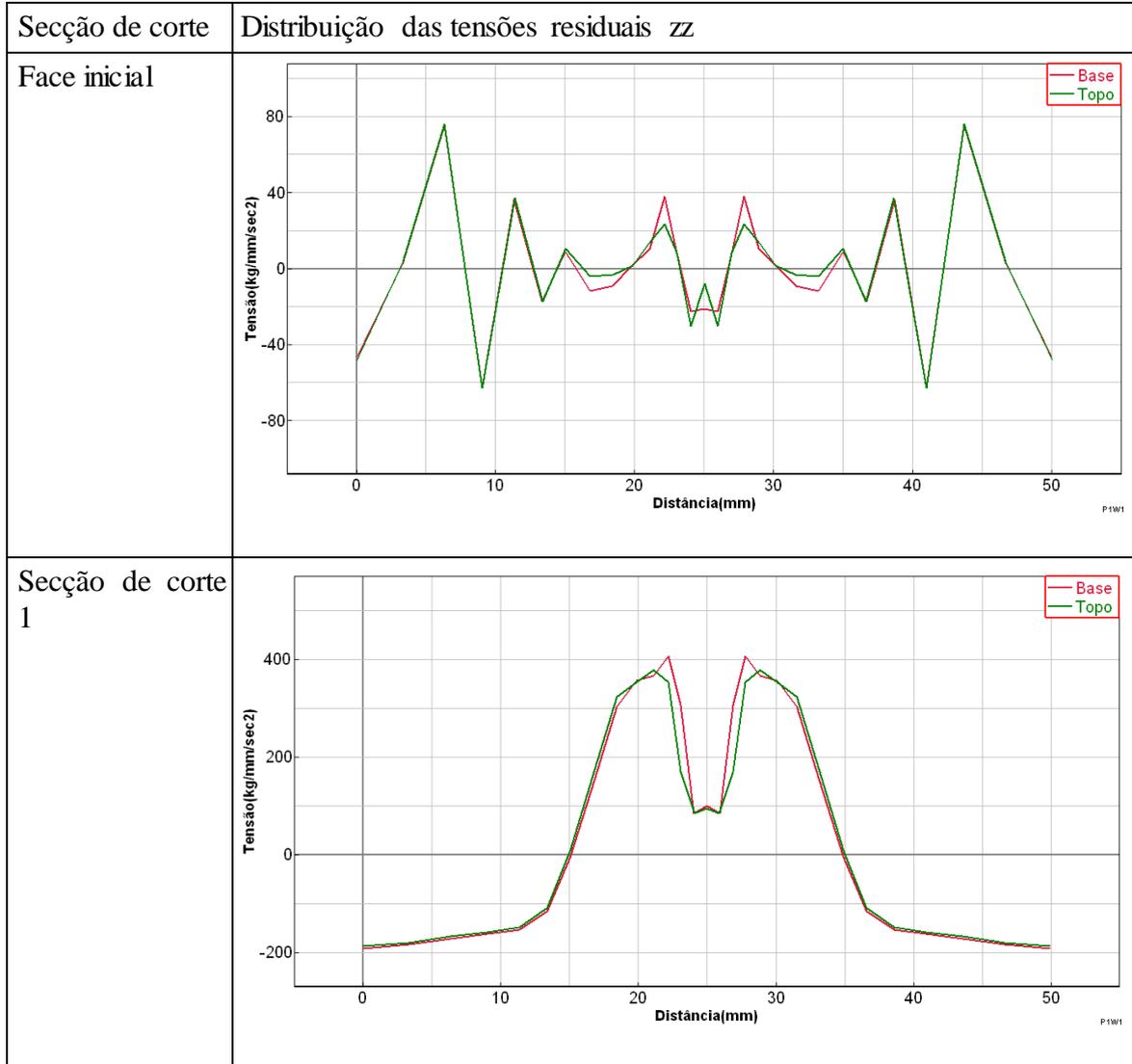
Tabela 53 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da espessura da placa, condição de fixação 2

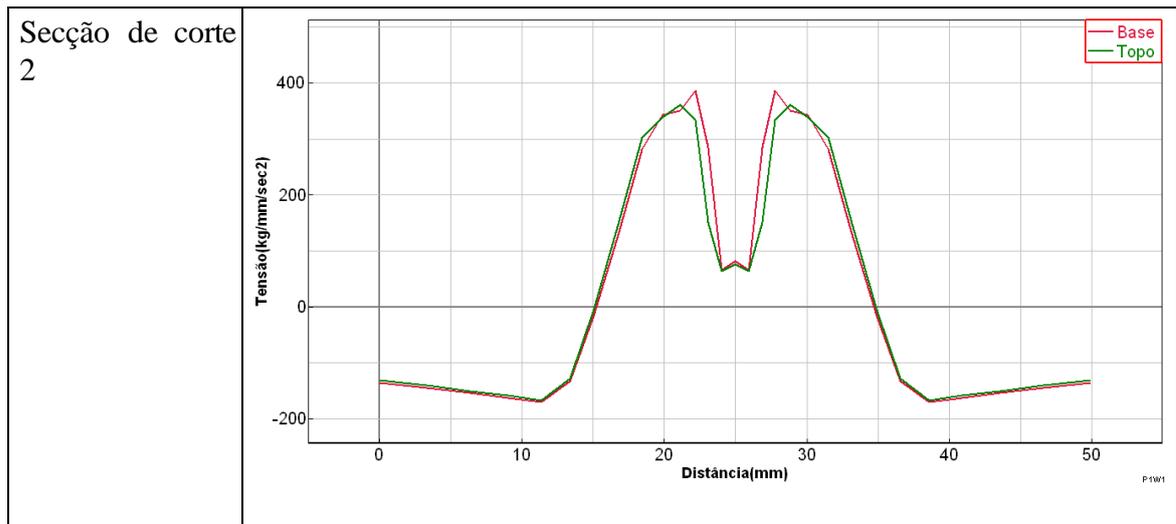


4.2.4.8 Condição de fixação 3.

4.2.4.8.1 Tensões segundo zz

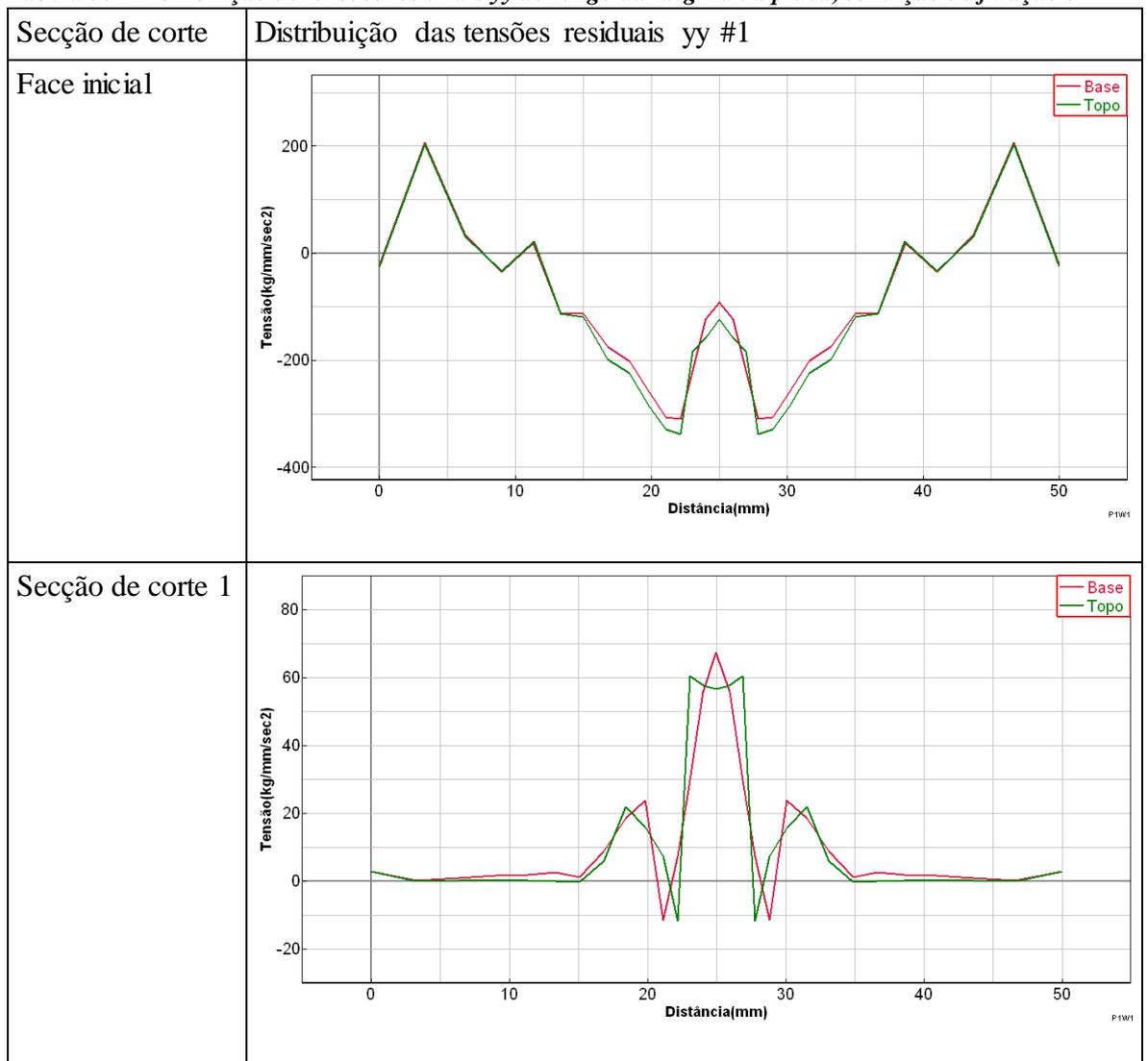
Tabela 54 - Distribuição de tensões residuais zz ao longo da largura da placa, condição de fixação 3





4.2.4.8.2 Tensões segundo yy

Tabela 55 - Distribuição de tensões residuais yy ao longo da largura da placa, condição de fixação 3



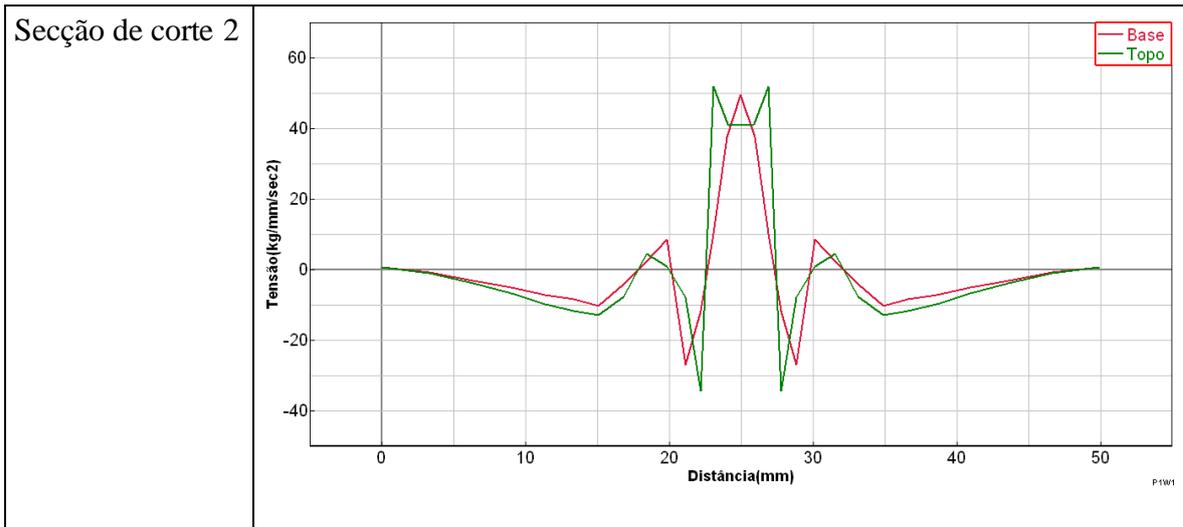
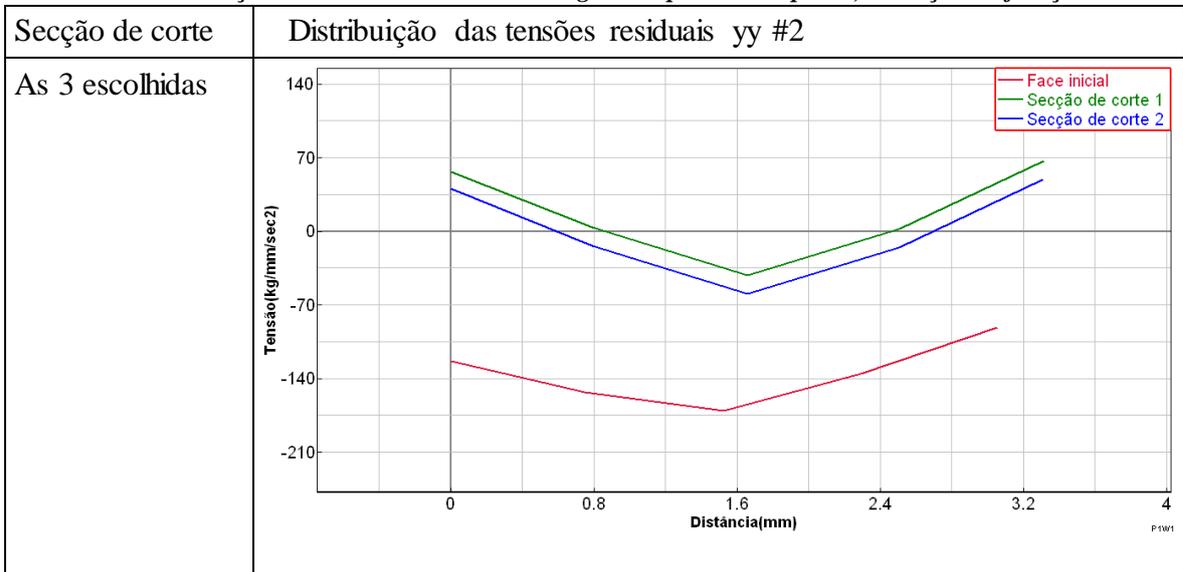


Tabela 56 - Distribuição de tensões residuais ao longo da espessura da placa, condição de fixação 3



4.2.4.8.3 Tensões segundo xx

Tabela 57 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da largura da placa, condição de fixação 3

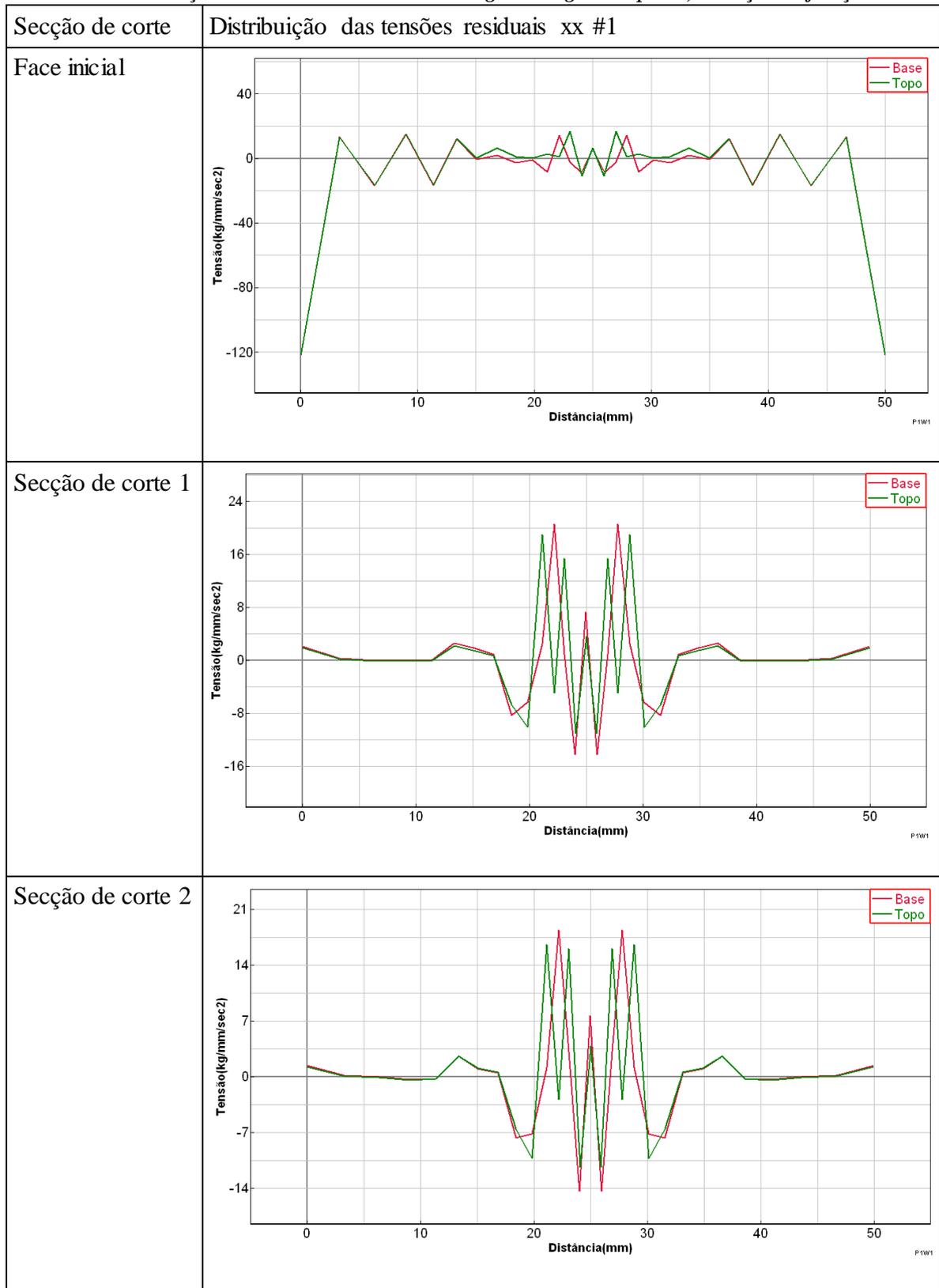
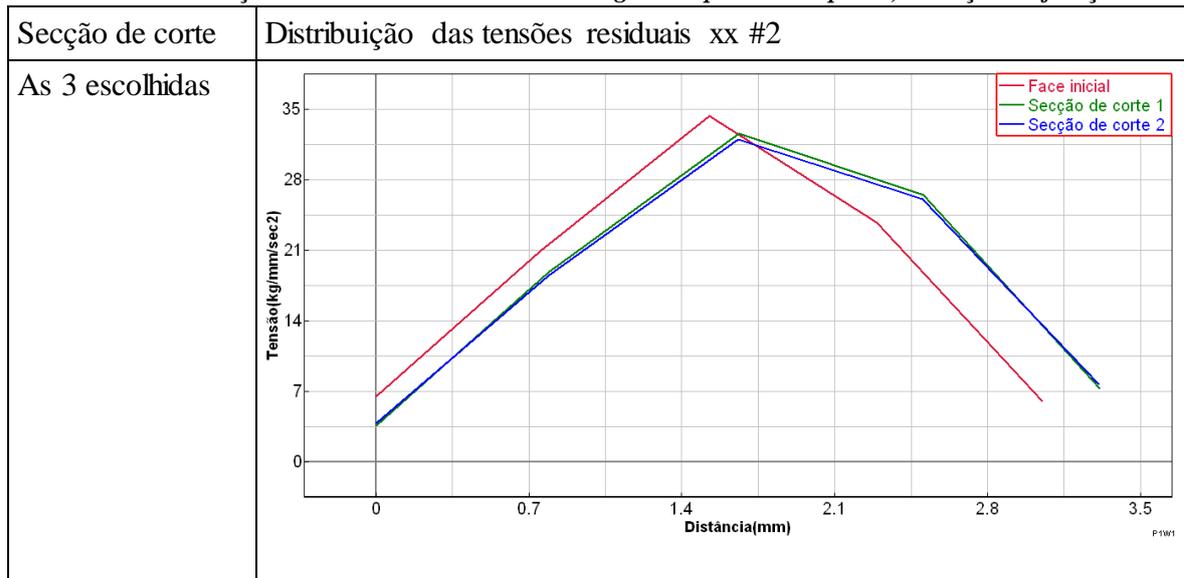


Tabela 58 - Distribuição de tensões residuais xx ao longo da espessura da placa, condição de fixação 3



4.2.4.9 Representação gráfica de tensões residuais yy função do comprimento da peça.

Para comparação com casos teóricos de tensões residuais segundo o comprimento da chapa, Figura 41, são extraídos os resultados das tensões residuais zz.

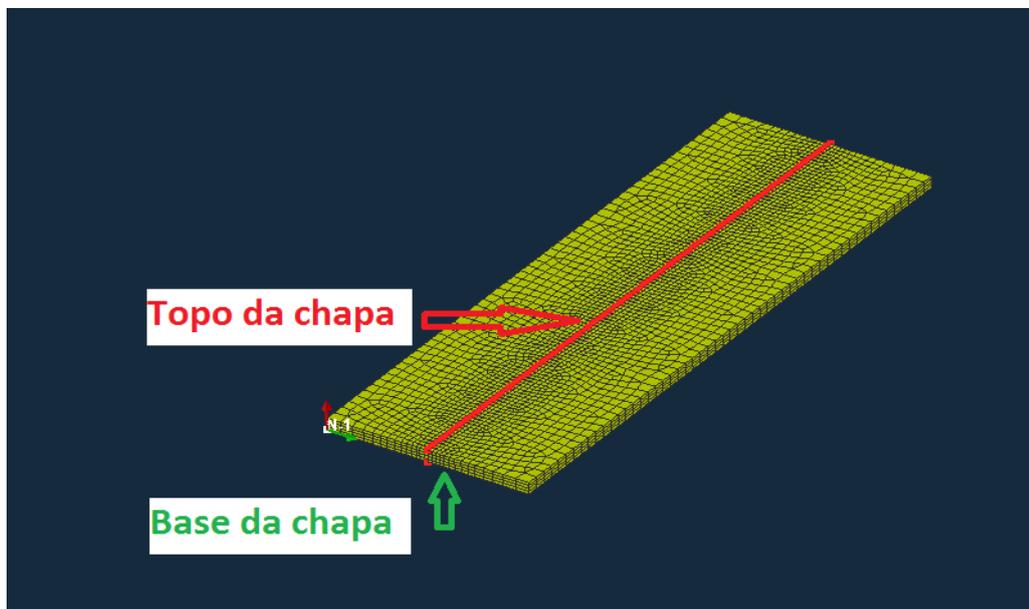


Figura 187 - Caminhos para extracção de resultados de tensões residuais ao longo do cordão de soldadura

Tabela 59 - Distribuição das tensões residuais yy ao longo do cordão do comprimento da peça

Condição de fixação	Distribuição das tensões residuais yy #2
1	
2	
3	

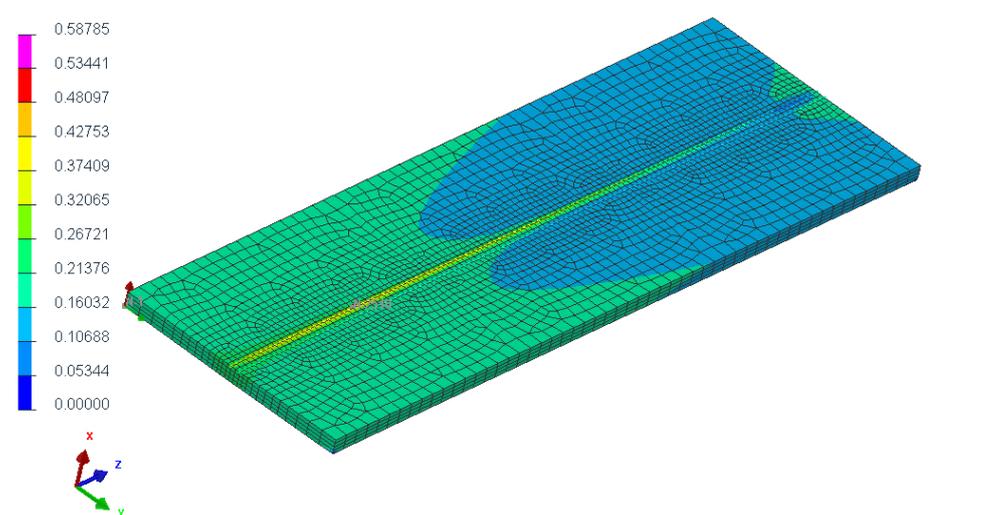
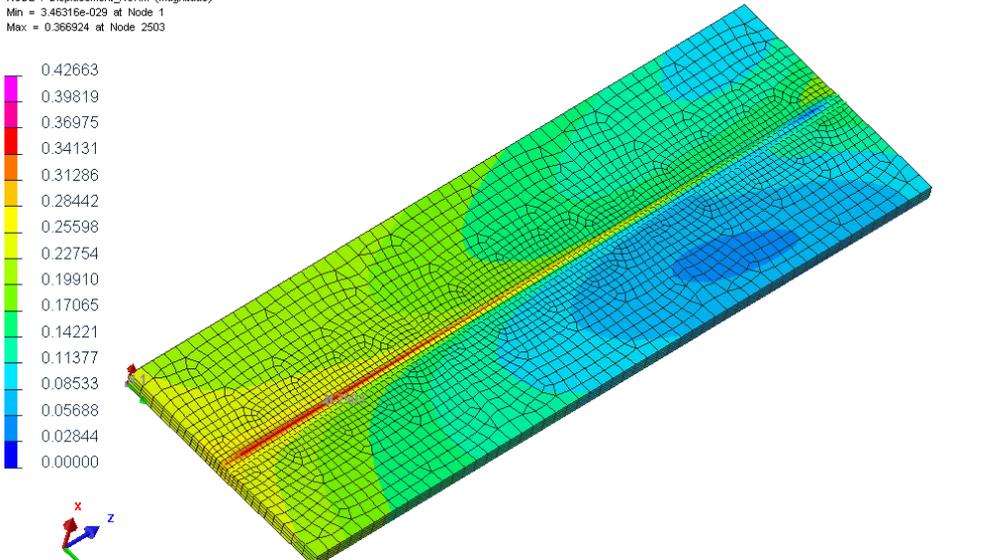
Não existem diferenças relevantes nestas tensões residuais consoante o tipo de fixação utilizado.

4.2.4.10 Campo de deslocamentos

As distorções resultantes da soldadura são mensuradas através do campo de deslocamentos normais.

Para as três condições de fixação são extraídos os campos dos deslocamentos para o instante final da simulação. Desses campos de deslocamento são elaborados os gráficos da Tabela 60 com base nos caminhos traçados nas Figura 188 e Figura 189.

Tabela 60 - Comparação das deformações para o instante final da simulação

Condição fixação	Segundo 60
1	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>TESTE3D NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 5.50778e-028 at Node 1 Max = 0.375204 at Node 2518</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: right;"> <p>133 / 60.000000</p> </div> </div> 
2	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>TESTE3D NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.46316e-029 at Node 1 Max = 0.366924 at Node 2503</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: right;"> <p>133 / 60.000000</p> </div> </div> 

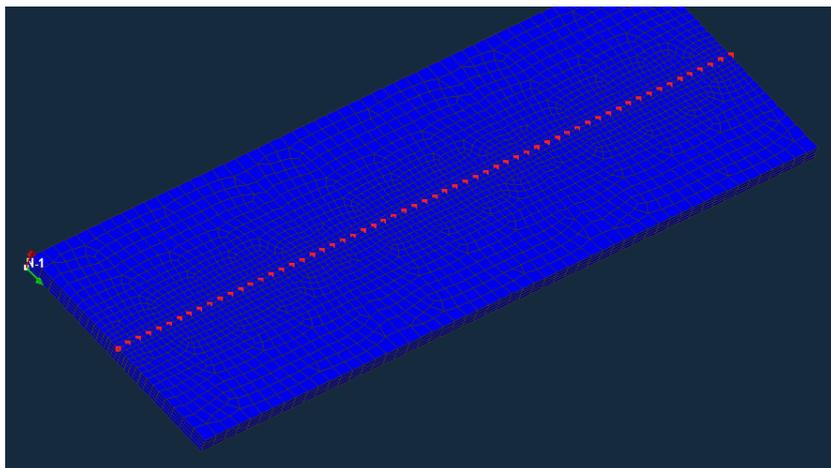
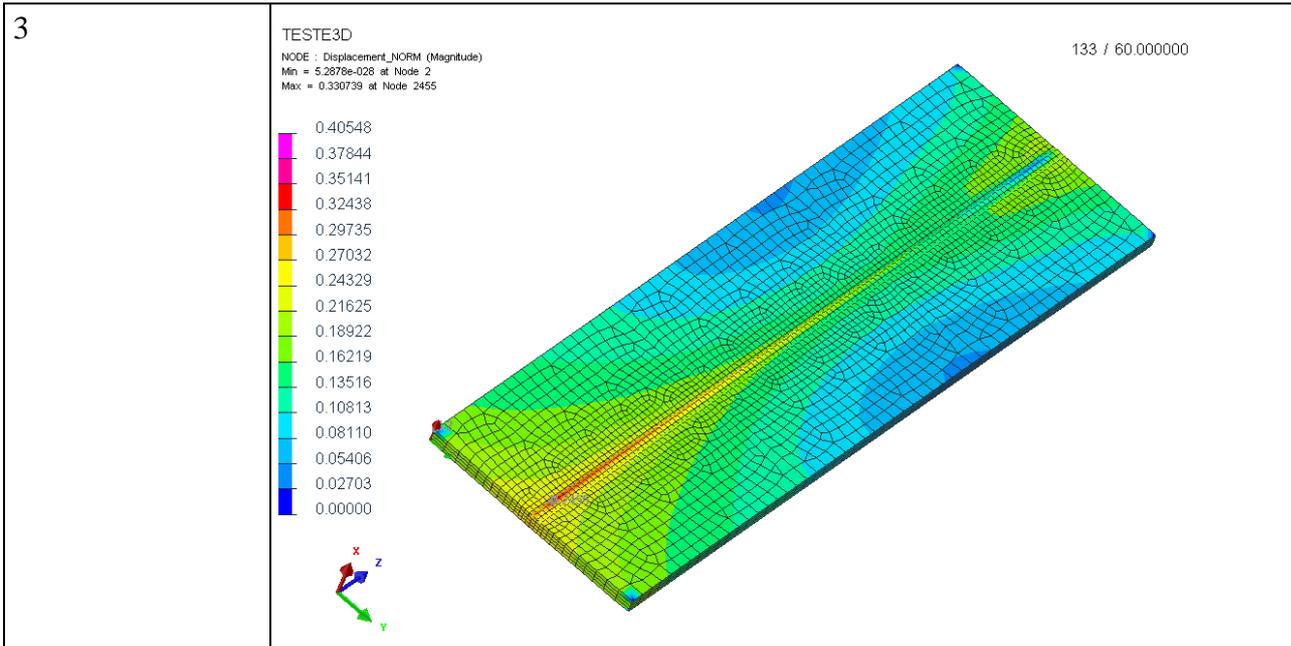


Figura 189 - Caminho superficial longitudinal ao cordão de soldadura

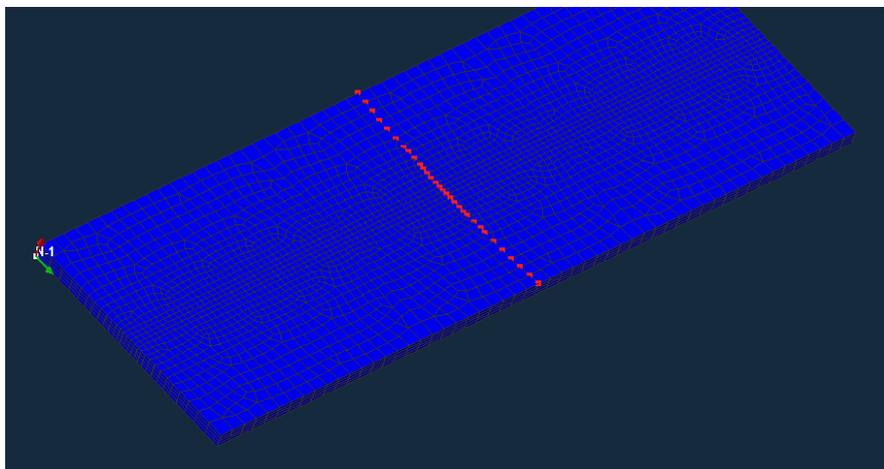
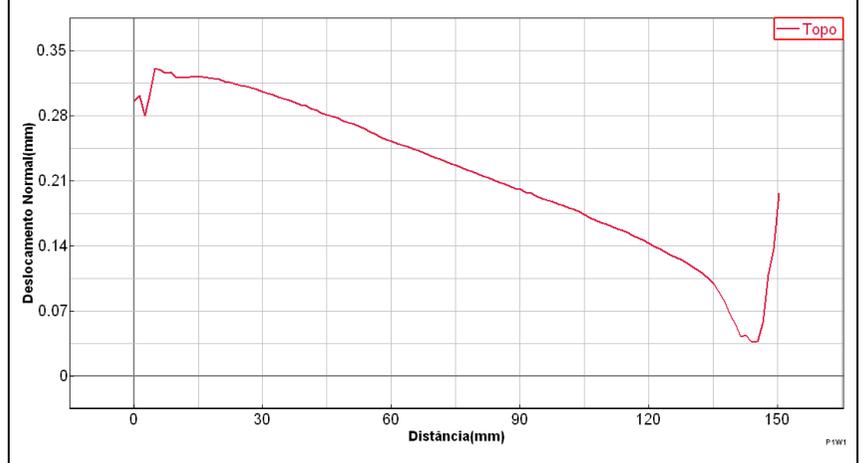
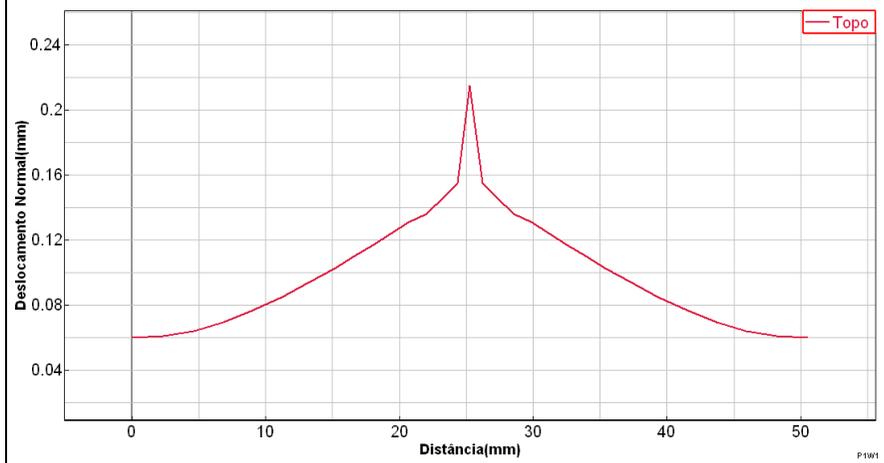


Figura 188 - Caminho superficial transversal ao cordão de soldadura

Tabela 61 - Magnitude dos deslocamentos normais da placa para as três condições de fronteira

Condição fixação	Magnitude de deslocamentos em sentido transversal a meio da placa	Magnitude de deslocamentos ao longo do cordão de soldadura
1	<p>Graph 1: Normal displacement vs distance at the center of the plate for condition 1. The y-axis is 'Deslocamento Normal(mm)' from 0.12 to 0.32. The x-axis is 'Distância(mm)' from 0 to 50. A red line shows a peak of approximately 0.32 mm at 25 mm distance.</p>	<p>Graph 2: Normal displacement along the weld line for condition 1. The y-axis is 'Deslocamento Normal(mm)' from 0.07 to 0.42. The x-axis is 'Distância(mm)' from 0 to 150. A red line shows a peak of approximately 0.38 mm at 30 mm distance.</p>
2	<p>Graph 3: Normal displacement vs distance at the center of the plate for condition 2. The y-axis is 'Deslocamento normal(mm)' from 0.06 to 0.3. The x-axis is 'Distância(mm)' from 0 to 50. A red line shows a peak of approximately 0.28 mm at 25 mm distance.</p>	<p>Graph 4: Normal displacement along the weld line for condition 2. The y-axis is 'Deslocamento normal(mm)' from 0 to 0.4. The x-axis is 'Distância(mm)' from 0 to 150. A red line shows a peak of approximately 0.38 mm at 30 mm distance.</p>

3



Os deslocamentos na transversal são condicionados pelas condições de fixação na direcção da largura da placa (ver caso de fixação 2, *Tabela 61*). Nos três casos a zona do cordão de soldadura é onde apresenta um maior deslocamento normal, fruto das maiores variações térmicas ocorrentes nessa região.

Os deslocamentos ao longo do cordão de soldadura apresentam um perfil semelhante para os três casos de fixação, não diferindo muito na sua ordem de grandeza.

4.3 Erros comuns em Sysweld

Por ser um *software* em contínuo desenvolvimento, com a corrente utilização do *Sysweld* o utilizador é deparado com obstruções à obtenção de um modelo final.

Grande parte desses erros tem indicação na consola do *software*, não sendo por vezes totalmente explícitos quanto à forma da sua resolução.

De salientar erros cometidos frequentemente pelos utilizadores. Durante o pré-processamento o facto de não haver consistência entre os elementos das peças gera resultados errados, tais como a aplicação de calor apenas na zona de soldadura, ficando a envolvente a esta a temperaturas próximas da ambiente. A forma de corrigir este problema é unir os nós coincidentes “*Checks – Coincident Nodes*”.

Erros de falta de ligação entre elementos sólidos poderão estar relacionados com deficiências na elaboração da malha de elementos finitos. Por exemplo, na elaboração de uma malha de elementos finitos 3D a partir de uma 2D, será da maior importância ter em atenção as linhas/pontos/vectores a partir do qual será feito o *3D Sweep (Drag)*, pois poderão estar presentes incompatibilidades geométricas. A falta de ligação entre elementos 3D poderá também estar relacionada com as camadas de elementos 2D presentes no modelo de forma invisível (mas listadas no menu *Parts*). Ao serem seleccionados os grupos, estes podem conter incompatibilidades, recomendando-se portanto a eliminação dos elementos 2D e uma recriação dos grupos.

Outro erro bastante comum que ocorre desta vez durante o *Welding Advisor* do *Visual Weld*, é a localização do directório para alocação dos resultados. A pasta deste directório não deverá conter espaços no seu nome e o ficheiro de base *.vdb* deverá estar contido nessa pasta. Caso contrario, é exibida uma mensagem de aviso e os ficheiros serão gerados numa pasta localizada em “*Documentos*” ou num ficheiro temporário.

Ainda no *Welding Advisor* durante a definição das propriedades de soldadura, para uma soldadura laser, há um número mínimo para o diâmetro de base do feixe laser. Apesar do *software* efectuar o processamento com um diâmetro demasiado baixo e obter resultados, aquando da edição deste valor o *software* colapsa.

Durante a etapa final do “*Visual Weld*”, “*Generate input data*”, por vezes surge uma mensagem de erro indicando que não foram gerados todos os ficheiros *.DAT* ou que o projecto é incoerente. Uma forma de contornar este erro é criar um novo directório para o qual o ficheiro de base *.vdb* será copiado. Depois disso no *Welding Advisor* o nome do projeto é alterado e efectua-se novamente a extracção dos ficheiros para processamento.

Erros relacionados com a licença poderão indicar que a mesma se encontrará bloqueada no servidor e carecerá de reiniciação.

4.4 Caso de estudo Weld Planner

Recorrendo ao caso de estudo desta dissertação, são dados a introduzir os conceitos básicos do funcionamento do *software Weld Planner*. O seu carácter é bem mais simplista para a modelação de soldadura, fornecendo apenas os resultados das distorções totais das mesmas. Essa mesma simplicidade fará com que os tempos de processamento das soluções sejam consideravelmente menores quando comparados com o *Sysweld*.

É um *software* sem a capacidade de geração de geometria bem como da malha de MEF, sendo estes importados através do *Visual Mesh* em formato *.ASC*.

Será feito neste capítulo uma descrição dos passos para obtenção das distorções para a placa do caso de estudo, sendo comparadas as distorções com os valores finais obtidos em *Sysweld*.

4.4.1 Modelo a submeter para análise

Dado ser necessário importar uma geometria de outros *softwares*, esse modelo deverá ter características específicas de forma a facilitar a sua integração no ambiente *Weld Planner*.

O modelo gerado será 3D, idêntico ao utilizado no caso de estudo 3D, Figura 190.

Em *Visual Mesh* são eliminadas as partes referentes à área de transferência de calor e às soldaduras. Todos os grupos exceptuando os nós de fixação são eliminados. A linha de soldadura bem como os parâmetros de soldadura serão gerados devidamente no *Weld Planner*.

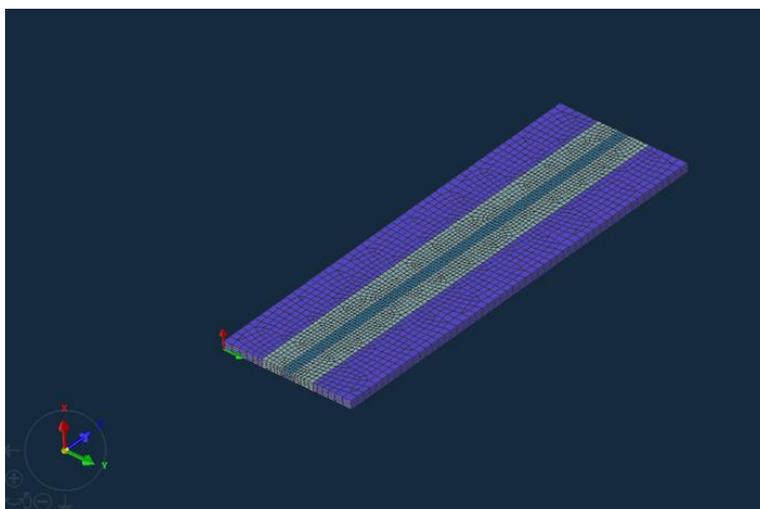


Figura 190 - Modelo importado do Visual Mesh

É necessário ter uma precaução com a nomeação dos grupos, sendo preferencialmente estes nomeados de “CLAMP_XX”.

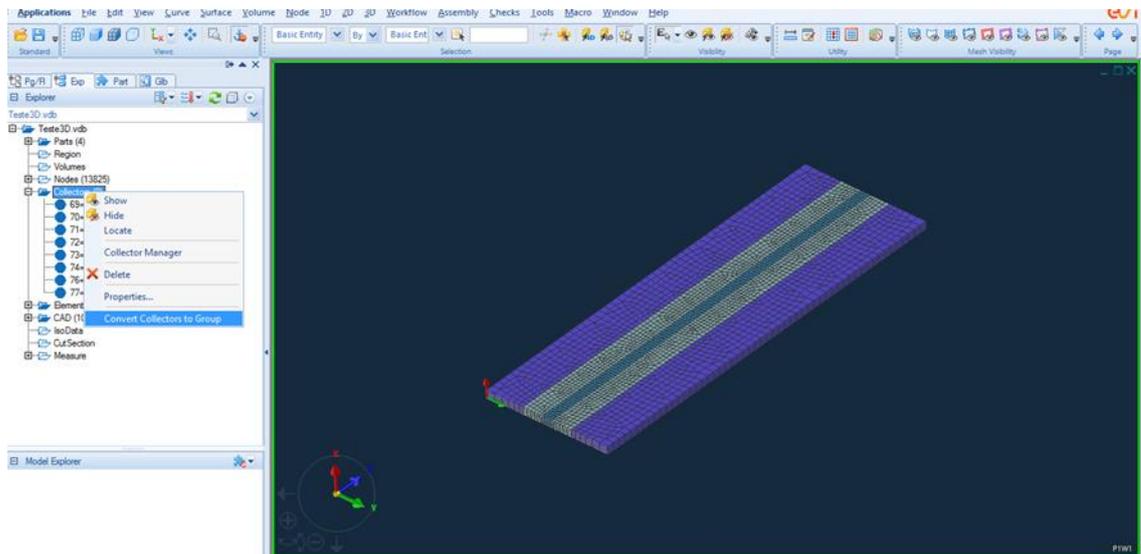


Figura 191 – Conversão dos Collectors em Groups

Elaborado está o modelo, os *Collectors* assinalados na Figura 191, deverão ser convertidos para grupos, clicando com o botão direito do rato sob o campo *Collectors*. Desta forma estes grupos serão automaticamente definidos como fixadores no *Weld Planner*.

Por fim é necessário exportar o ficheiro (*File – Export*) como formato *.ASC* de forma à geometria poder ser importada para o *Weld Planner*, Figura 192.



Figura 192 - Exportar ficheiro com extensão .ASC

4.4.2 Funcionamento Weld Planner

No ficheiro da *ESI-Group – Weld Planner 12.5* é escolhido o tipo de processamento *32 bits*. Tal pode variar de acordo com as especificações de cada computador, Figura 193.

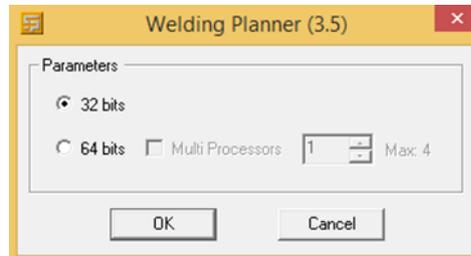


Figura 193 - Tipo de processamento Weld Planner

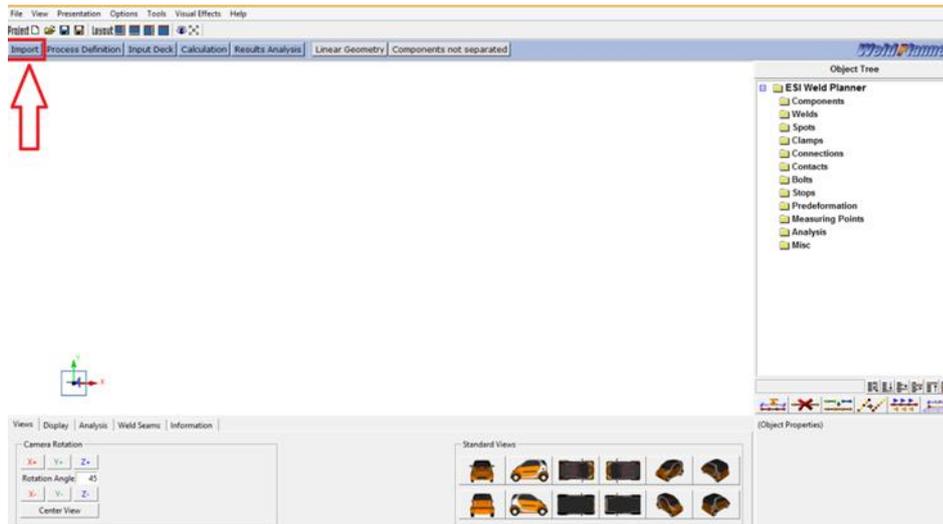


Figura 194 - Importar modelo

A importação do ficheiro gerado em *Visual Mesh* é feita através do botão *Import*, sendo escolhido o ficheiro de formato *.ASC*, Figura 194.

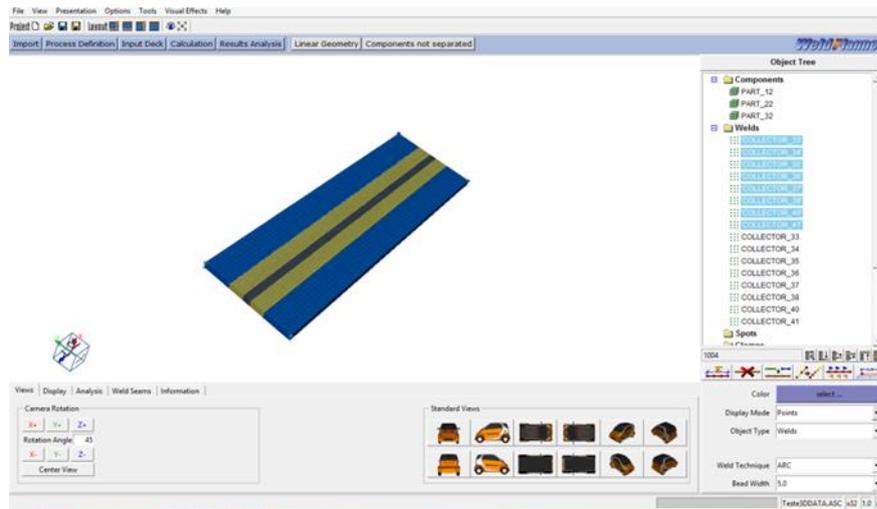


Figura 195 - Grupos repetidos

Como se pode ver da Figura 195, os fixadores foram automaticamente agrupados em *Clamps*, ficando na secção *Welds* esses mesmos fixadores de forma repetida. Selecionando a totalidade dos *Collectors*, estes devem ser movidos para o grupo *Clamps*, atribuindo-lhes essa propriedade, disponível no campo *Object Type*. Os fixadores excedentários deverão ser eliminados de forma a não obstruir o processamento futuro do modelo. Para os eliminar procede-se à sua selecção e clique no botão “Delete selected weld seams and clamps”, Figura 196.



Figura 196 - Eliminação de grupos repetidos

A definição do cordão de soldadura é o passo seguinte. Este é definido de uma forma muito mais básica do que a vista a ser realizada em *Visual Weld* para o caso de estudo.

No menu presente no lado inferior do ecrã, é escolhida a janela *Weld Seams* e a opção *Weld Definition – Path between 2 points*, Figura 197. Segue-se a colocação desses dois pontos no instante inicial e final da soldadura no modelo, Figura 198.

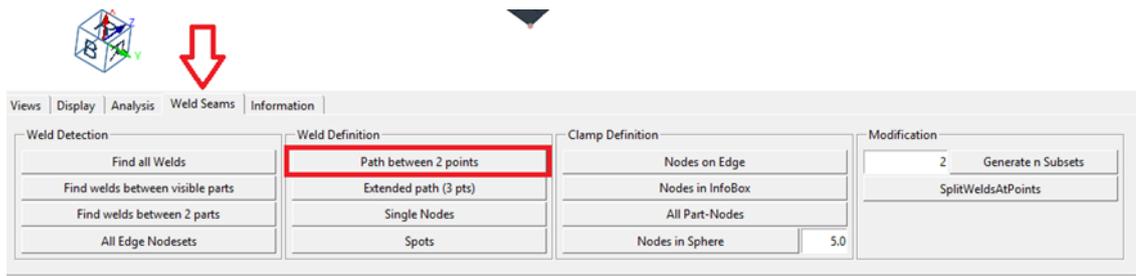


Figura 197 - Geração do cordão de soldadura



Figura 198 - Cordão de soldadura gerado

Para se definirem os parâmetros de soldadura, no menu *Object Tree*, é possível escolher entre uma soldadura de “Arco” ou de “Feixe”, bem como a largura do cordão de soldadura, Figura 199.

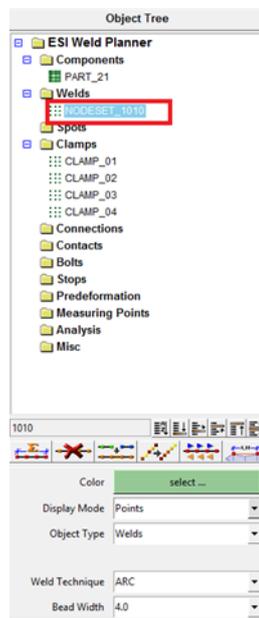


Figura 199 - Parâmetros de soldadura Weld Planner

Em relação às propriedades do material, é escolhido o aço S355J2G3 para ficar coincidente com o caso de estudo realizado em *Sysweld*.

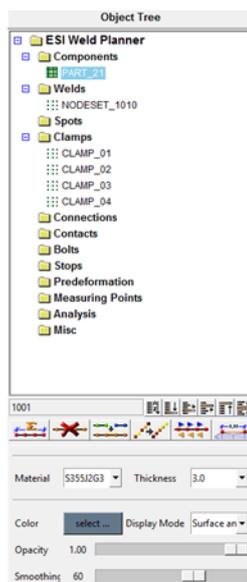


Figura 200 - Propriedades do material Weld Planner

O último grupo aqui definido será o dos fixadores “Clamps”. As condições de fronteira são intuitivamente escolhidas, podendo os apoios serem alternados entre rígidos e elásticos, sendo atribuídas as limitações de movimento em cada direcção.

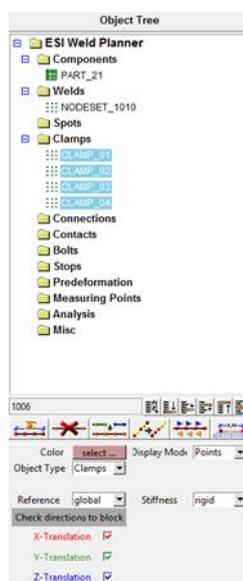
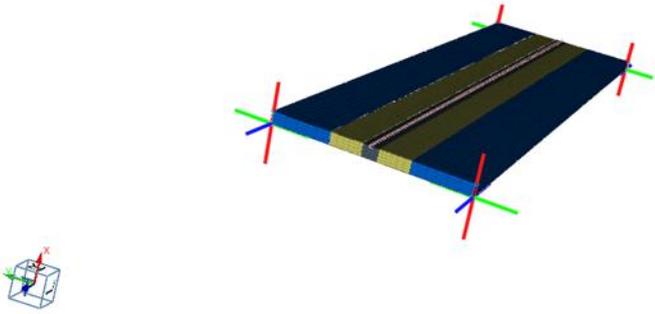
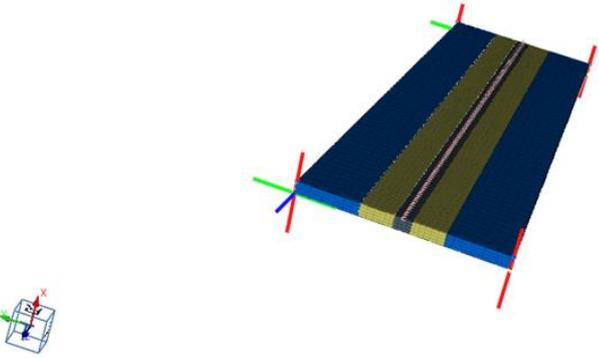
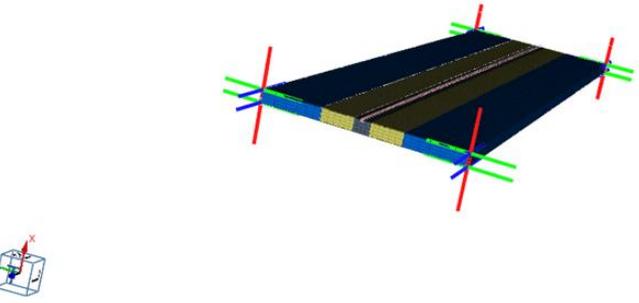


Figura 201 - Propriedades dos fixadores Weld Planner

Serão estudados os três casos de fixação abordados no caso de estudo 3D da Tabela 19, Tabela 62.

Tabela 62 - Condições de fixação em Weld Planner

<p>Condição fixação 1</p>	
<p>Condição fixação 2</p>	
<p>Condição fixação 3</p>	

Como as condições de equilíbrio de uma placa fina, como a do caso de estudo, são frágeis, de forma a se obter a mesma direção da deformada do caso de estudo em *Sysweld*, são introduzidas condições de fixação após a realização do processo de soldadura Figura 202.

O mesmo acontece nas simulações feitas para *Sysweld*, em que as chapas estavam submetidas a condições de fixação durante o arrefecimento.

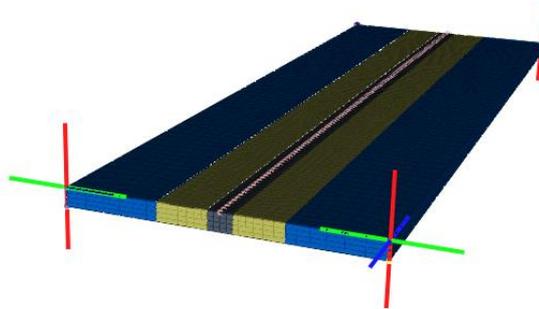


Figura 202 - Condição de fixação após soldadura

No caso do modelo de *Weld Planner* dispor de várias soldaduras ou ser pretendido que os tipos de carregamentos, fixadores entre outros elementos variem ao longo do processo de soldadura, uma forma de controlar os vários estágios do processo é recorrer à função *Process Definition*, Figura 203.

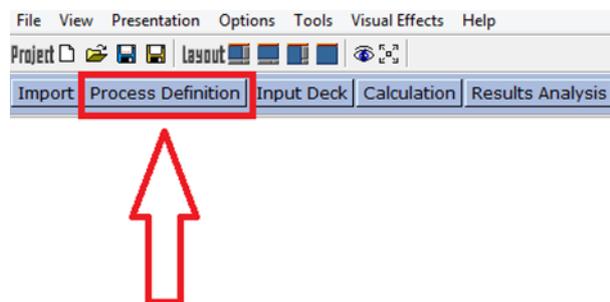


Figura 203 - Definição da sequência de soldadura

O processo de soldadura pode ser pré-visualizado em *Process Definition* através do botão *Preview*, Figura 203.

Posto isto é necessário gravar o ficheiro antes de o submeter ao processamento. Sendo o ficheiro salvo na extensão *.wpp*, Figura 204.

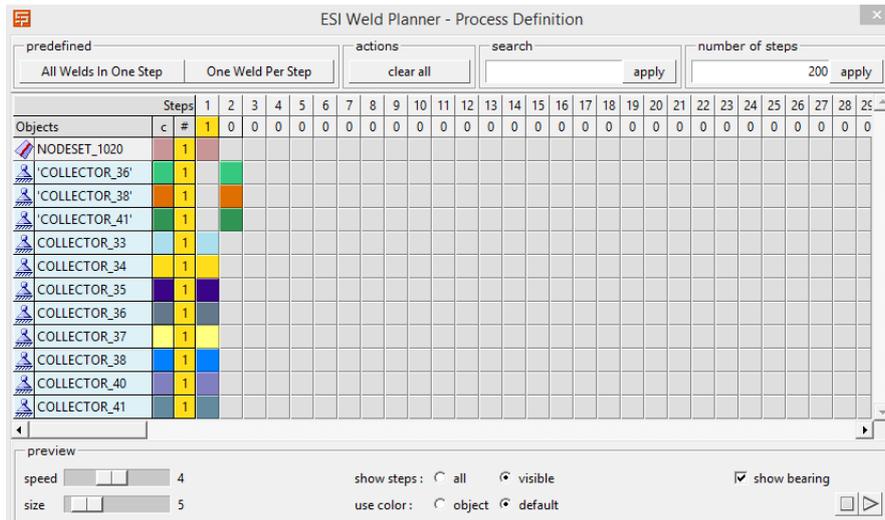


Figura 204 – Sequência de soldadura

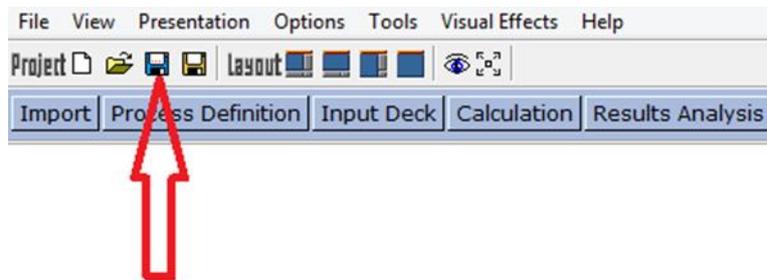


Figura 205 – Salvar modelo Weld Planner

Na sequência de soldadura, as condições de fixação depois da soldadura são colocadas no estágio 2, Figura 204.

4.4.3 Processamento Weld Planner

O processamento poderá ser feito com geometria linear ou não linear, Figura 206. A opção não-linear engloba a análise de largos deslocamentos, contendo as não linearidades geométricas resultantes da soldadura. Para comparação serão posteriormente analisados resultados destes dois tipos de análise.

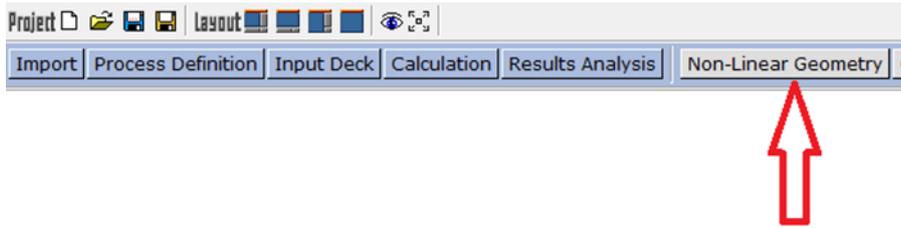


Figura 206 - Tipo de análise do modelo

Antes de submeter o ficheiro para análise é necessário gerar um ficheiro de formato *.pc* (*PAM-crash*), Figura 207. Só assim será possível correr a análise pois o *Weld Planner* utiliza o processador *PAM-Crash* para processamento de resultados.

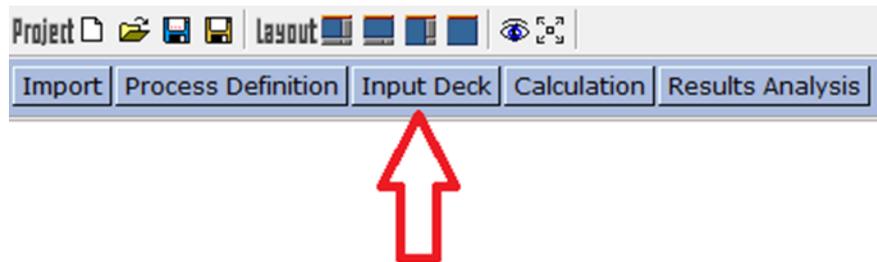


Figura 207 - Gerar ficheiro em formato .pc

No botão *Calculation* é dada a ordem para processamento. Será apenas gerado um estágio para este processamento, correspondendo à deformação total gerada nesta soldadura.

4.4.4 Pós processamento

O *Weld Planner* possui uma ferramenta de pós-processamento, sendo de carácter bastante limitado. A análise será então feita no *Visual Viewer*, estando a informação contida no ficheiro gerado *STAGE1_RESULT.erfh5*.

No menu *Contour* do *Visual Viewer* é escolhido a análise das distorções em cada nó.

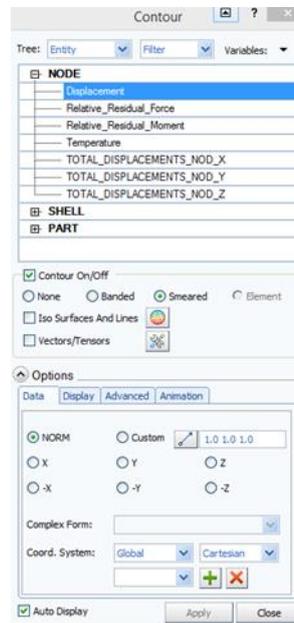


Figura 208 - Menu Contour Visual Viewer. Seleção de resultados

4.4.4.1 Condição de fixação 1

Para o instante final da soldadura, e análise geométrica não-linear, o campo de deslocamentos no topo da chapa é o seguinte:

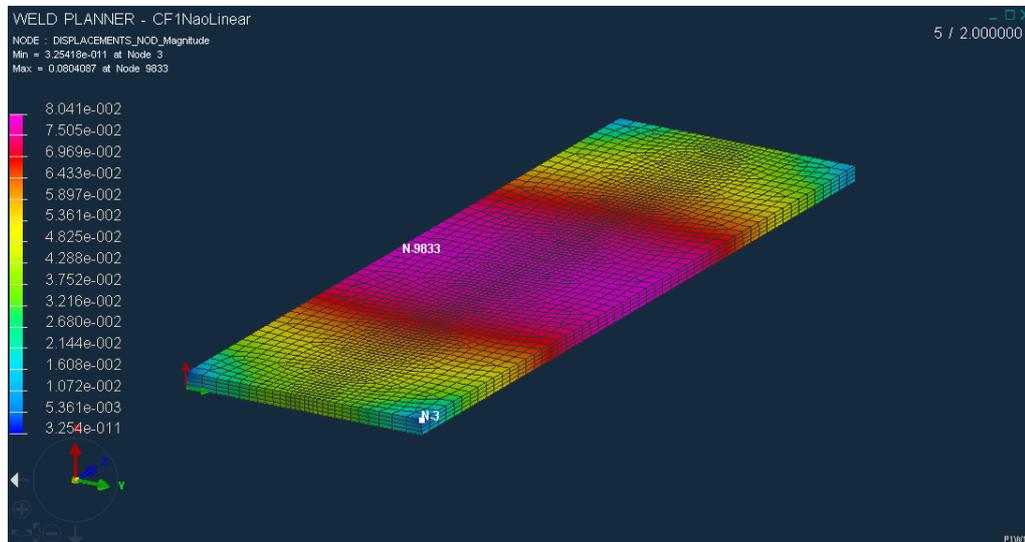


Figura 209 - Distorção final da placa. Condição de fixação 1. Análise não linear

Como referido no capítulo referente à descrição do *Weld Planner*, os campos de tensões residuais não são realistas, pelo que apenas o campo das distorções será objecto de análise.

Para um processamento de geometria linear, o mesmo apresentará a seguinte forma:

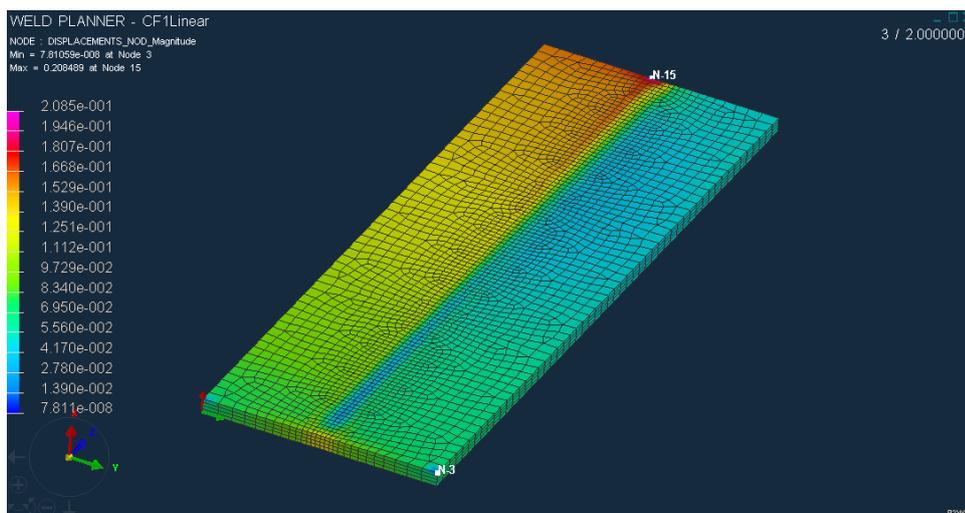


Figura 210 - Distorção final da placa. Condição de fixação 1. Análise linear

4.4.4.2 Condição de fixação 2

Análise não linear:

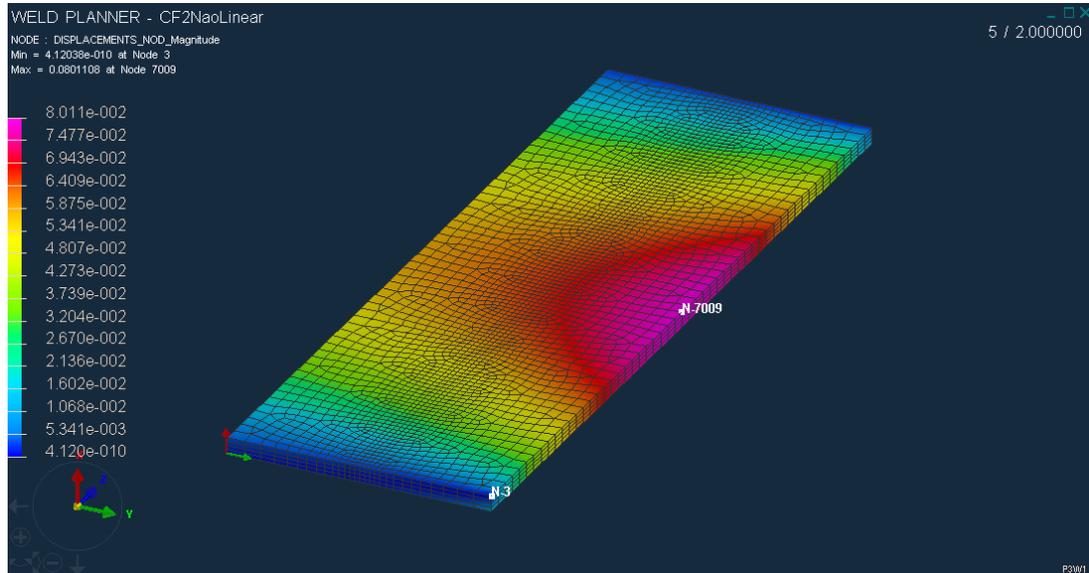


Figura 211 - Distorção final da placa. Condição de fixação 2. Análise não linear

Análise linear:

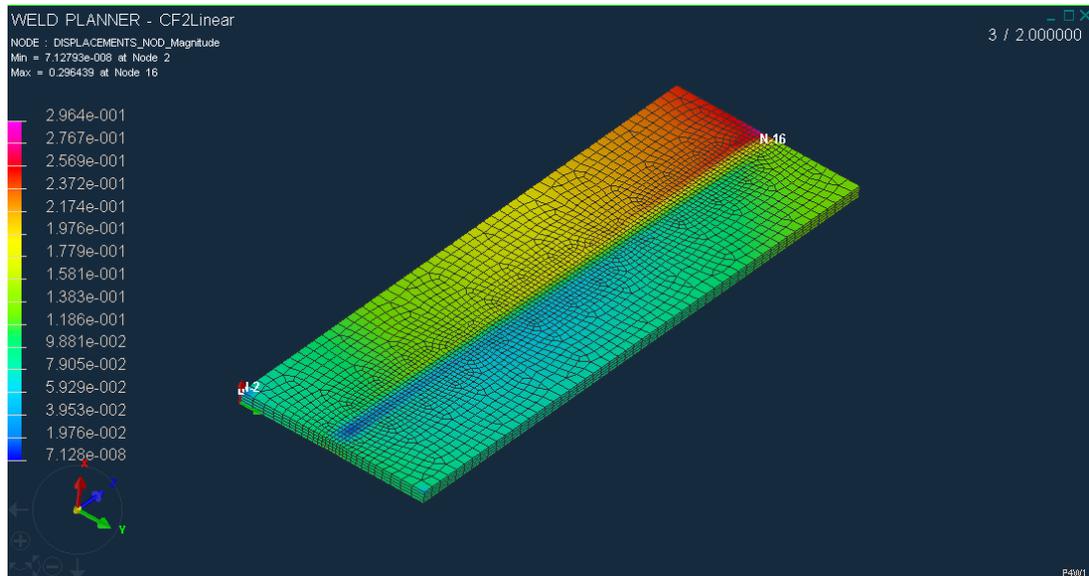


Figura 212 - Distorção final da placa. Condição de fixação 2. Análise linear

4.4.4.3 Condição de fixação 3

Análise não-linear:

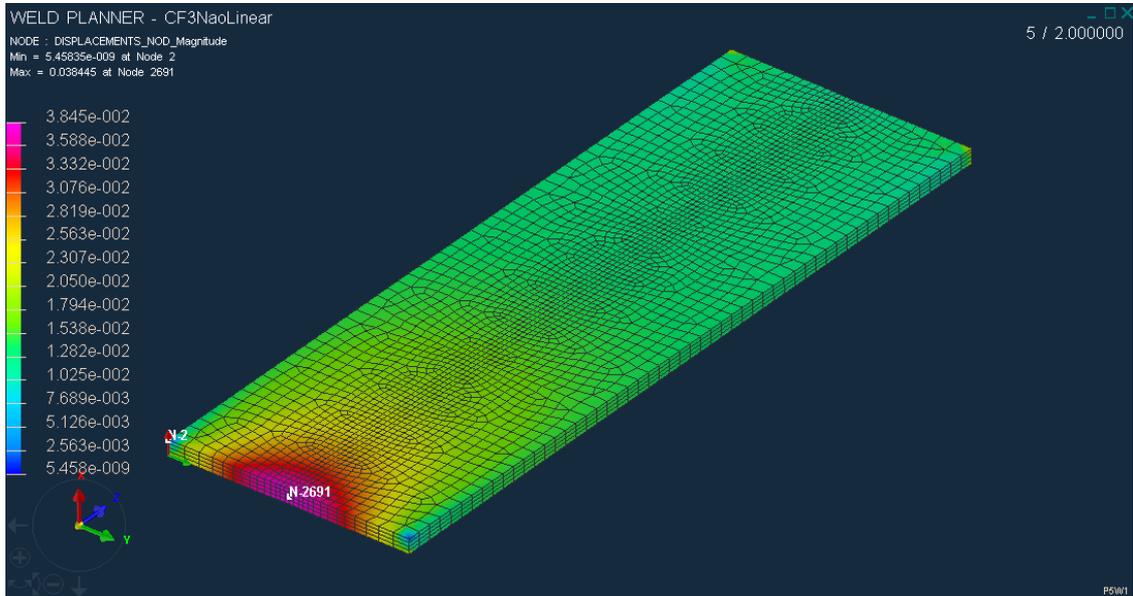


Figura 213 - Distorção final da placa. Condição de fixação 3. Análise não linear

Análise linear:

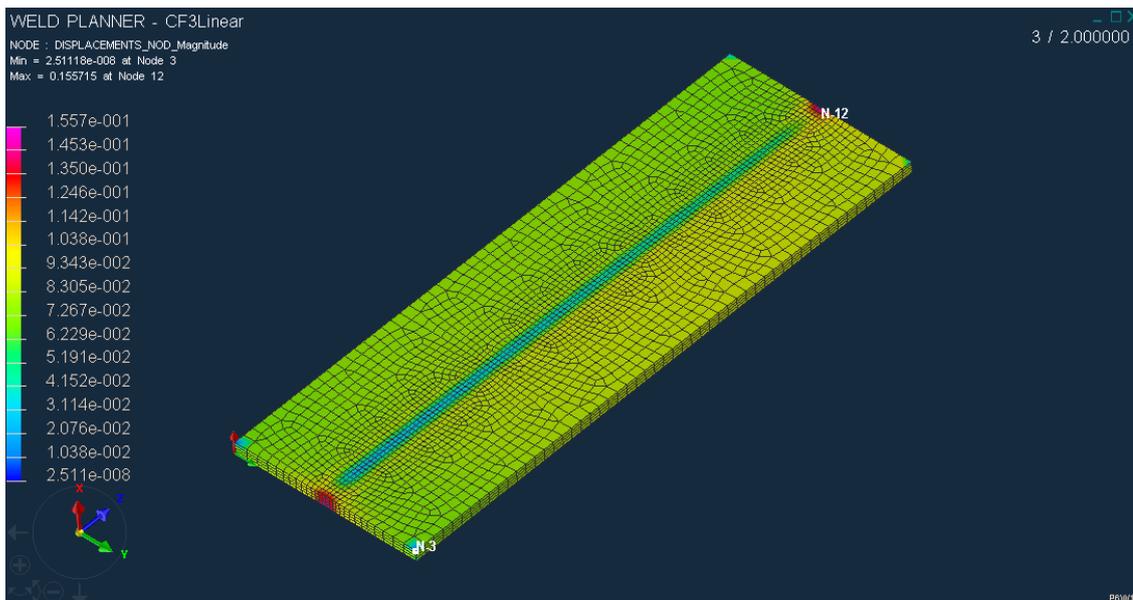
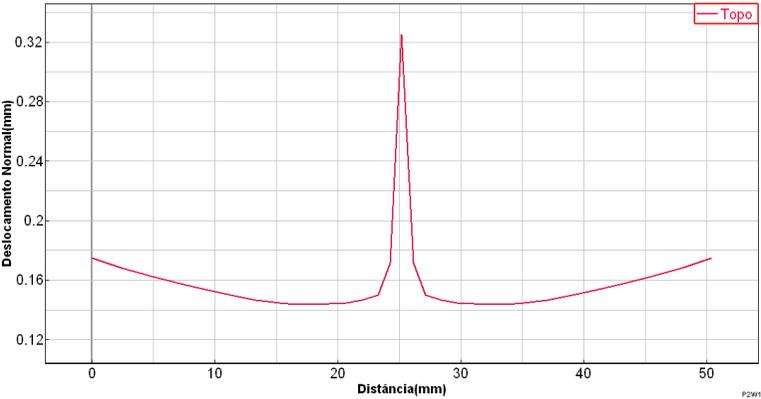
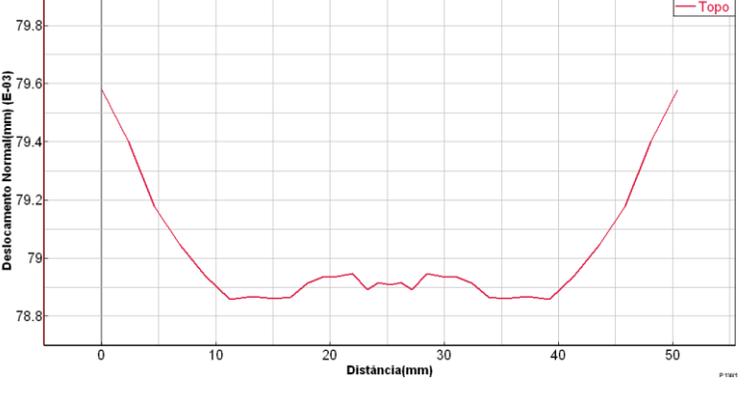


Figura 214 - Distorção final da placa. Condição de fixação 3. Análise linear

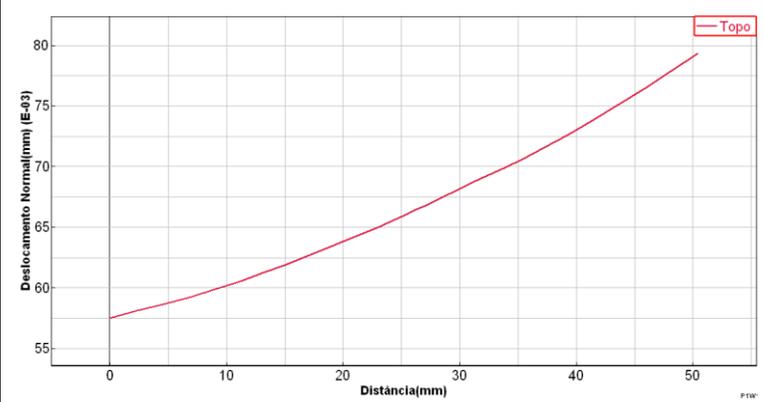
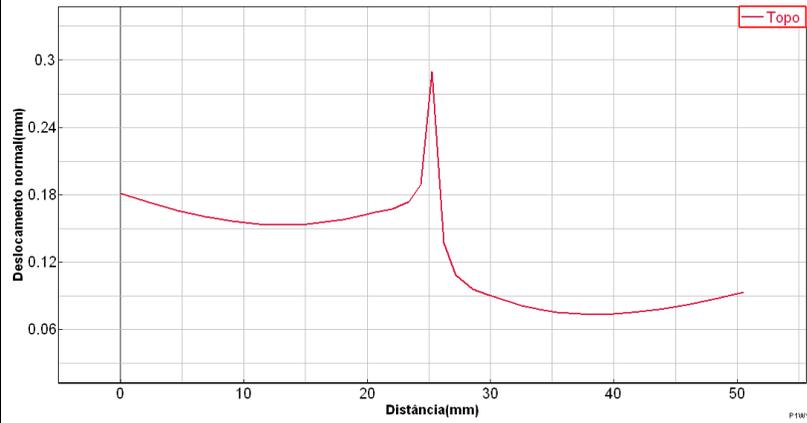
4.4.5 Comparação de resultados

Comparando resultados obtidos em *Sysweld*, para o campo de deslocamentos na transversal ao cordão de soldadura a meio da chapa e na longitudinal ao mesmo, com os obtidos em *Weld Planner* seguindo a mesma orientação. O ensaio comparativo utilizado para *Weld Planner* é a simulação não-linear por ser considerada mais realista.

Tabela 63 - Comparação resultados campo de deslocamentos transversal ao cordão de soldadura

Condição de fronteira	<i>Sysweld</i>	<i>Weld Planner</i> (não linear)
1		

2



3

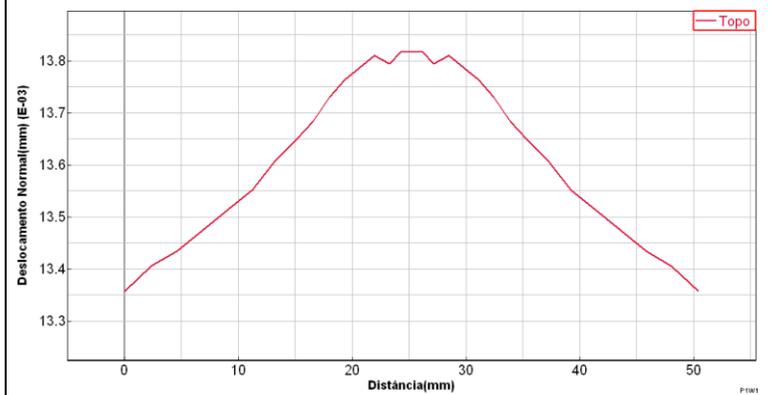
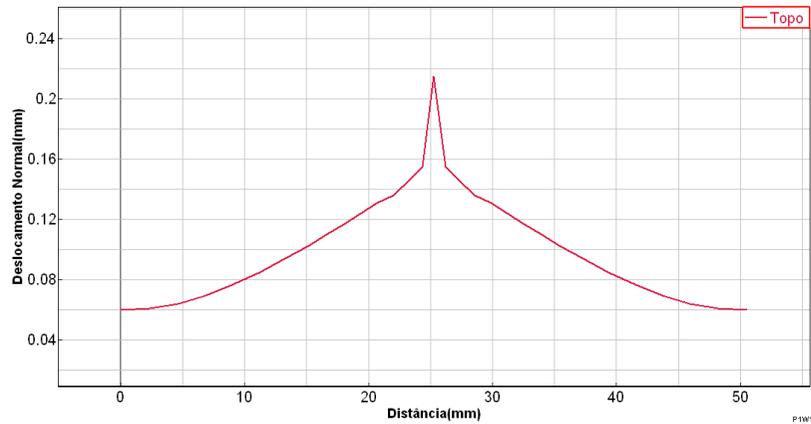
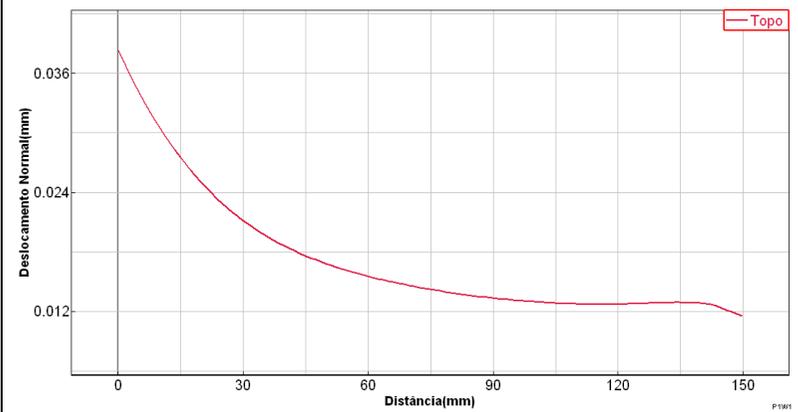
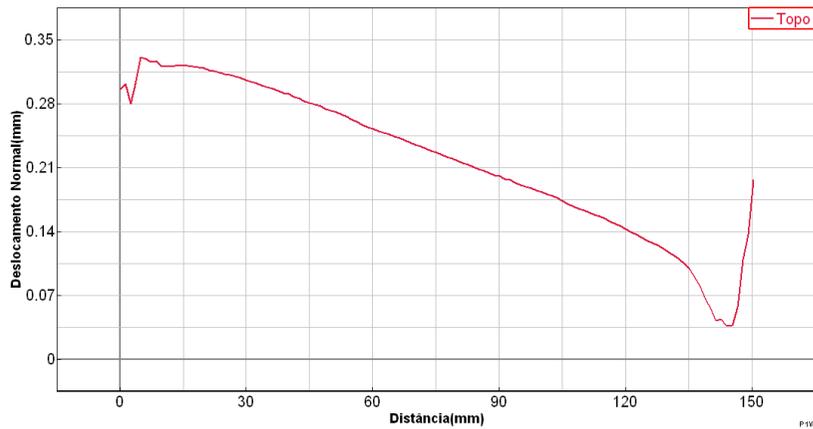


Tabela 64 - Comparação de resultados longitudinal ao cordão de soldadura

Condição de fronteira	<i>Sysweld</i>	<i>Weld Planner</i> (não linear)
1	<p>Deslocamento Normal(mm)</p> <p>Distância(mm)</p> <p>P2W1</p>	<p>Deslocamento Normal(mm)</p> <p>Distância(mm)</p> <p>P1W1</p>
2	<p>Deslocamento normal(mm)</p> <p>Distância(mm)</p> <p>P1W1</p>	<p>Deslocamento Normal(mm)</p> <p>Distância(mm)</p> <p>P1W1</p>

3



Da Tabela 63 e Tabela 64, não é visível qualquer relação entre os deslocamentos obtidos pelo mesmo modelo e mesmas condições de fixação entre os dois *softwares*. Em geral a ordem de grandeza dos deslocamentos apresentados por *Weld Planner* é bastante inferior à apresentada em *Sysweld*. A distribuição dos deslocamentos normais ao longo quer da transversal da chapa quer da longitudinal ao cordão de soldadura não apresenta uma tendência bem definida como acontece em *Sysweld*.

5. Caso experimental

Esta parte da dissertação foi realizada com base em soldaduras realizadas pelo aluno do mestrado integrado em engenharia mecânica da FEUP, André Silva, tendo as chapas soldadas sido seleccionadas dos ensaios realizados na empresa EDAETECH – Engenharia e Tecnologia, S.A., com sede em Esposende.

Dos ensaios realizados foram controlados alguns parâmetros que servirão de base à implementação do modelo em método dos elementos finitos.

5.1 Dados fornecidos

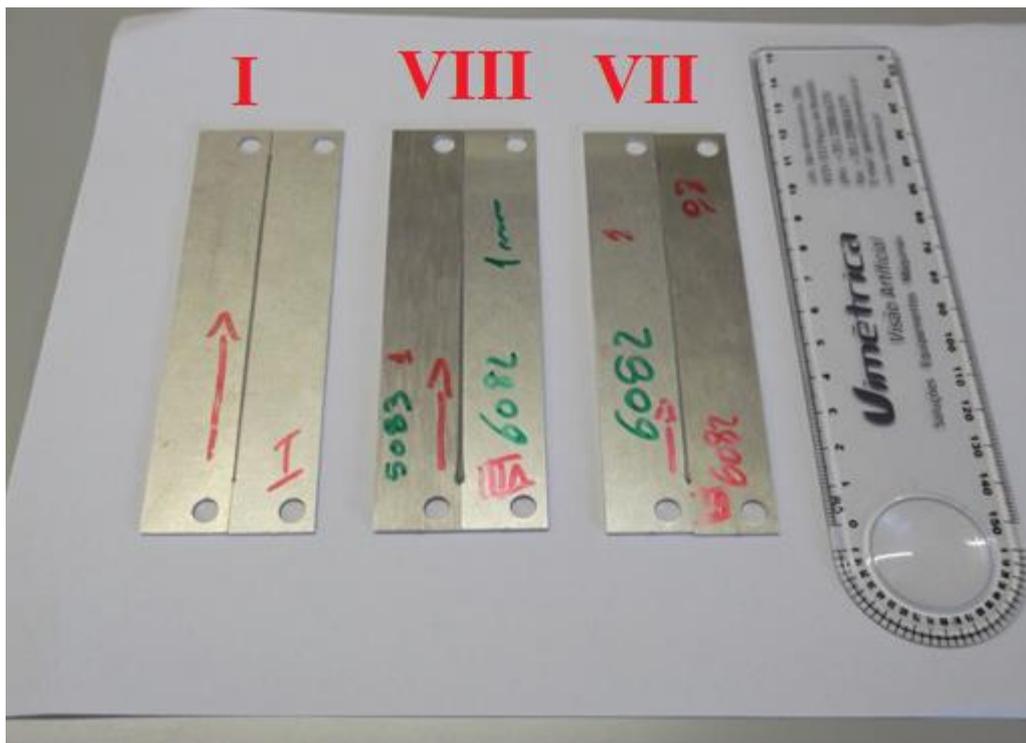


Figura 215 - Provetes ensaiados

As chapas fornecidas dispõem de uma legenda ilustrativa do material de cada placa constituinte, da espessura, número do ensaio e direcção do cordão de soldadura, Figura 215. É possível verificar a não uniformidade do cordão de soldadura, existindo uma maior largura na região inicial do mesmo, ocorrendo aí penetração total das chapas para o ensaio VII e VIII.

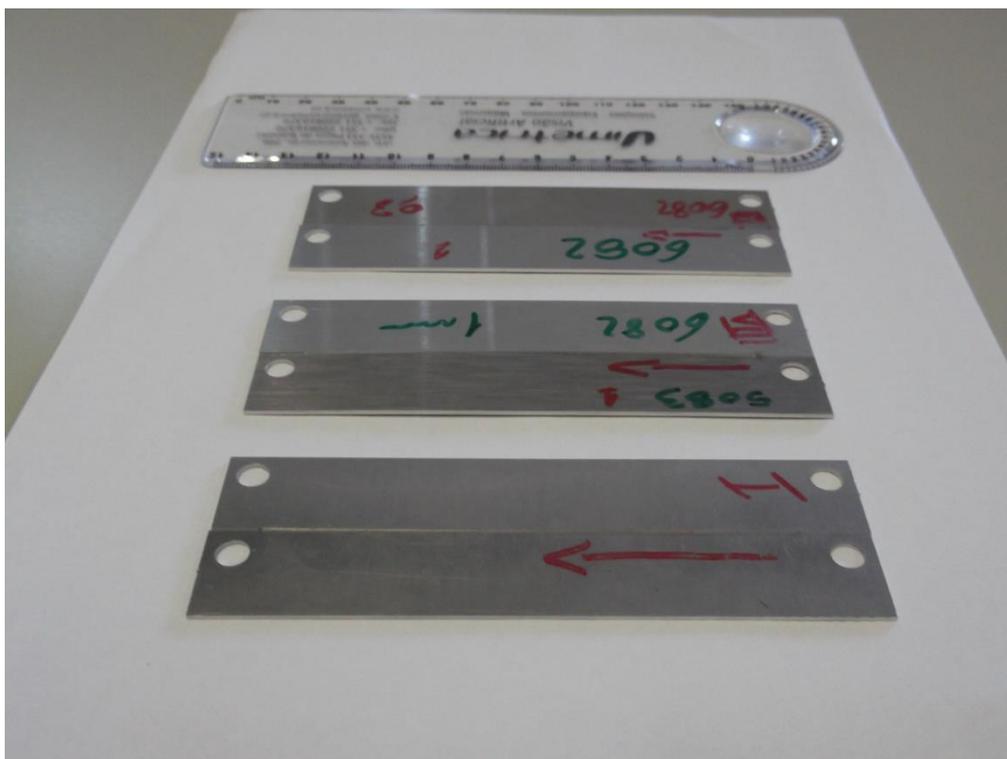


Figura 216 - Vista lateral dos provetes

Na Figura 216 é possível ter uma noção quantitativa das distorções por flexão ocorridas nos provetes. Considerando a superfície da mesa como sendo plana, é de notar que os três provetes tomaram uma deformada convexa, sendo esta ligeiramente maior no ensaio VIII.

Tabela 65 - Dados fornecidos dos ensaios experimentais

	Ensaio I	Ensaio VII	Ensaio VIII
Material	Liga de alumínio 5083	Liga de alumínio 6082	Liga de alumínio 5083 (chapa esquerda) e liga de alumínio 6082 (chapa direita)
Espessuras	1 mm	1mm (chapa esquerda), 0,8 mm (chapa direita)	1 mm
Velocidade soldadura	30 mm/s	30 mm/s	20 mm/s
Ângulo de incidência do feixe laser	90°	90°	90°

Condições de aperto: Segundo representado na Figura 217 e Figura 218, a base da mesa de soldadura limita a movimentação das chapas na vertical ao longo de quase toda a região da placa (exceptuando zona do cordão de soldadura). As barras de alumínio que fixam a chapa pelo topo, geram limitações de movimento em todas as direcções.

Cada chapa possui orifícios nas suas extremidades que serão utilizados para aparafusar as mesmas à mesa de soldadura. Após realizado o processo de soldadura, esses parafusos são desapertados. Esse processo demora cerca de 30 segundos.

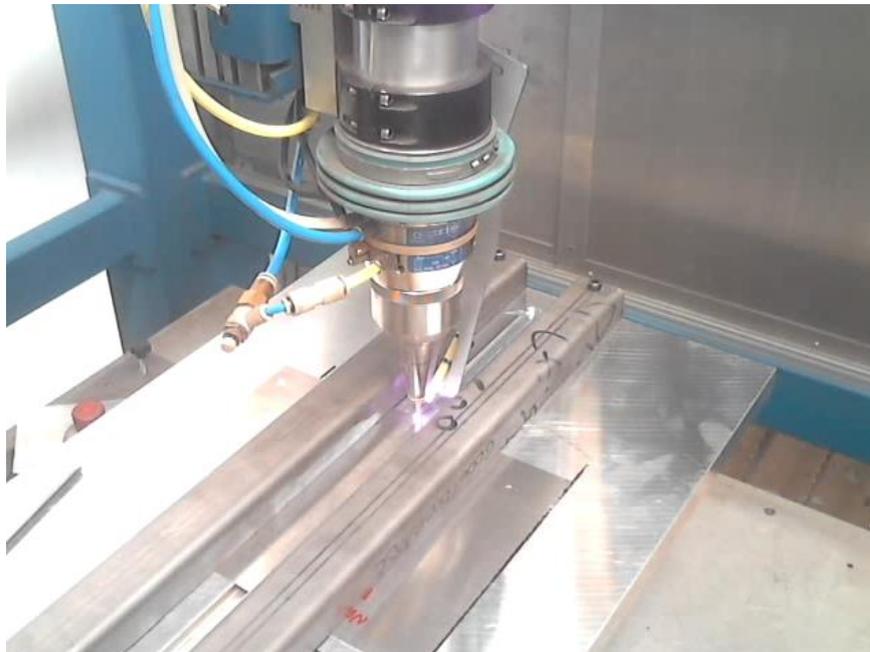


Figura 217 - Condições de realização do ensaio experimental #1

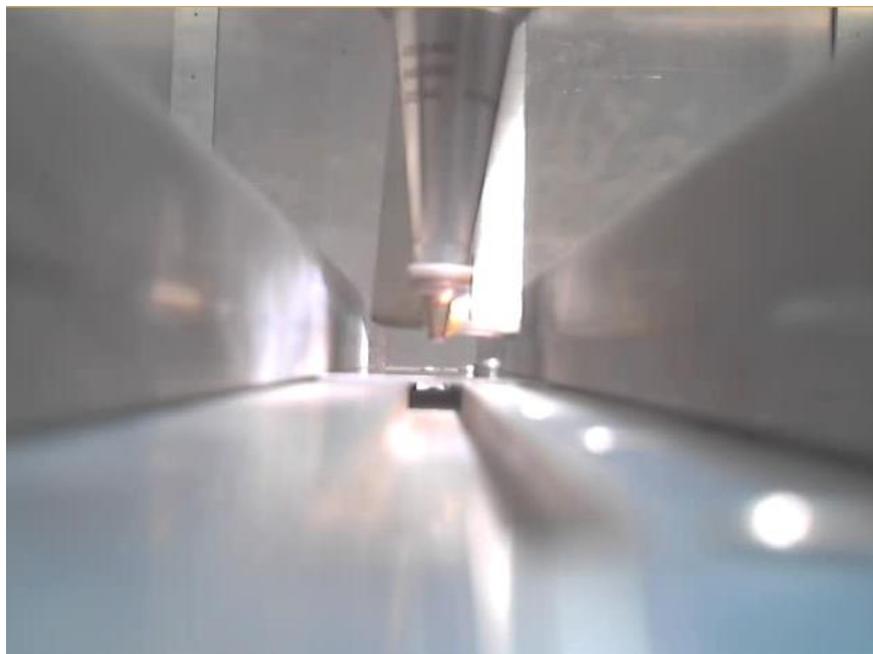


Figura 218 - Condições de realização do ensaio experimental #2

Os ensaios realizados foram condicionados por diversos factores não quantificados, tais como:

- Orientação do laminado da chapa
- Desnível da mesa de soldadura

- Ponto de foco incerto (nem sempre actuante no eixo neutro da chapa).
- Acelerações e velocidade inconstantes.
- Perturbações ao nível de ruídos e vibrações do ambiente fabril.
- Condições de fixação incertas.
- Área de dissipação de calor incerta.

Face a estas condicionantes, o objectivo da realização do ensaio experimental prende-se com a tentativa em implementar um modelo computacional que reproduza os efeitos distorcionais visíveis nas chapas obtidas. Esse modelo computacional será realizado em *Sysweld* sendo o processo de soldadura simplificado e tornado constante ao longo do tempo. Na impossibilidade de serem medidas as deformações das chapas obtidas com o rigor necessário (devido às suas dimensões diminutas), a base comparativa dos modelos será o sentido que a deformada tomará.

Não será feita uma validação do campo de tensões residuais, pelo que serão expostas neste capítulo a previsão do campo de tensões residuais obtidas pelo modelo em *Sysweld*.

5.2 Implementação do modelo 3D

Tanto o processo de geração da geometria como da malha de elementos finitos seguiram exactamente os mesmos métodos descritos no caso de estudo 3D, daí não ser feita referência a questões relativas à elaboração dessas etapas em *Visual Mesh* e *Visual Weld*. O aspecto final do modelo é apresentado na Figura 219.

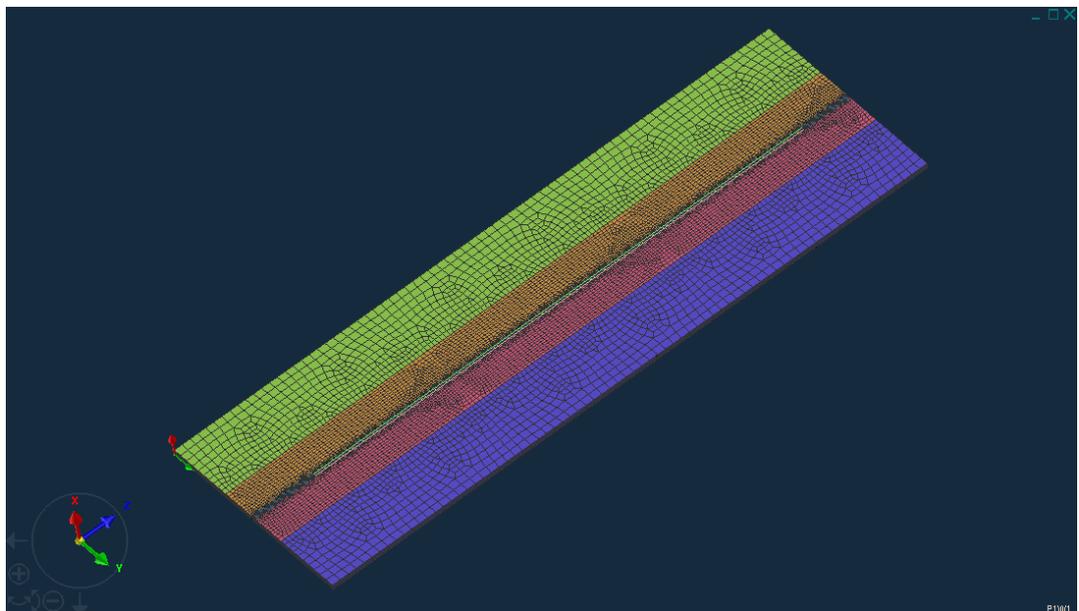


Figura 219 - Modelo 3D do caso experimental

Material: As ligas de alumínio utilizadas no ensaio experimental são da série 5000 (5083) e da série 6000 (6082). No catálogo de materiais em *Sysweld* e *Weld Planner* para ligas da série 5000 foi escolhido o material AlMgMn-Wire-AlMgSi e para ligas da série 6000 foi escolhido o material Ecodal608. As bases de dados para cada material diferem entre os dois *softwares*, sendo esta bastante mais complexa para *Sysweld*.

Processo de soldadura: Na incapacidade de lidar com todas as variáveis referentes ao processo de soldadura laser e desconhecendo o valor da penetração do cordão de soldadura, foram admitidas simplificações:

- Velocidade de soldadura constante.
- Penetração do cordão de soldadura a meia espessura.
- Largura do cordão de soldadura de aproximadamente 1mm no topo da chapa.

Sysweld: Para calibração do modelo de soldadura de acordo com as simplificações acima referidas, por via experimental utilizaram-se os seguintes valores dos parâmetros:

Tabela 66 - Parâmetros de soldadura dos modelos dos casos experimentais, Sysweld

Ensaio experimental	Ensaio I	Ensaio VII	Ensaio VIII
Velocidade de soldadura (mm/s)	30	30	20
Diâmetro superior de feixe laser (mm)	1	1	1
Diâmetro inferior de feixe laser (mm)	0,2	0,2	0,2
Penetração (mm)	0,1	0,1	0,1
Energia por unidade de comprimento (J/mm)	18	18	18
Eficiência do processo (%)	44	44	44

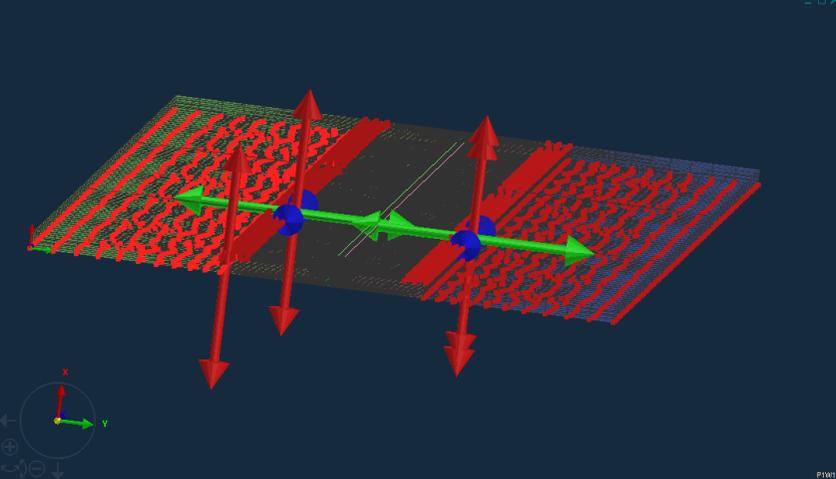
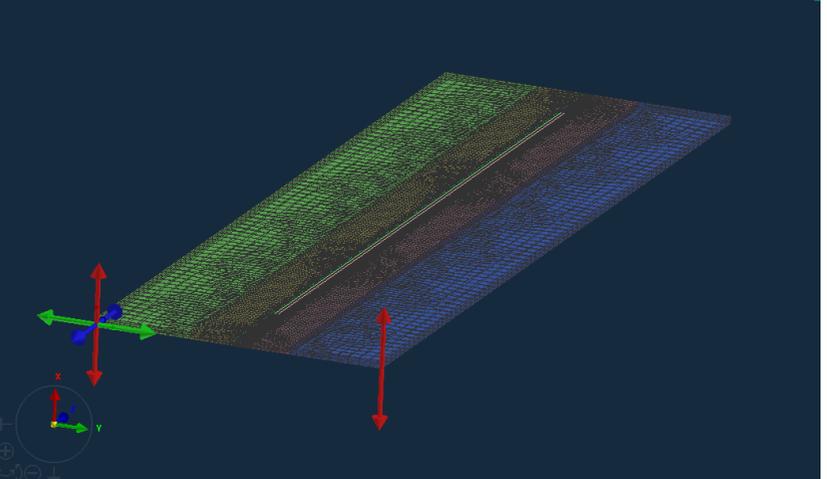
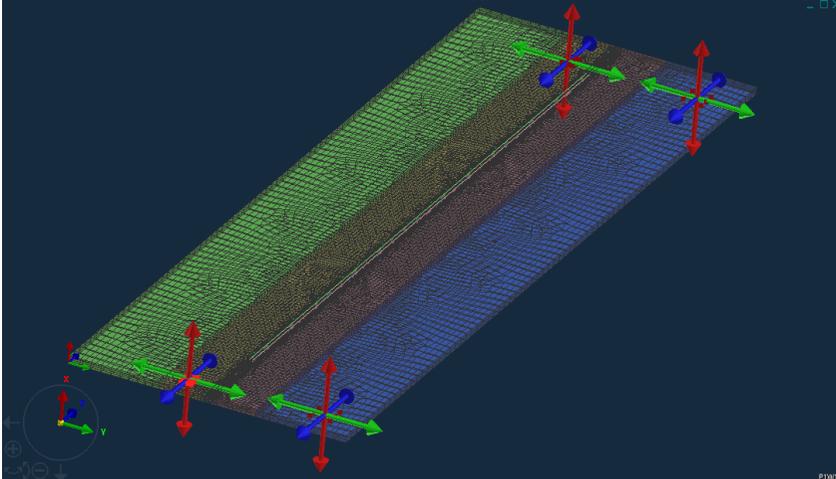
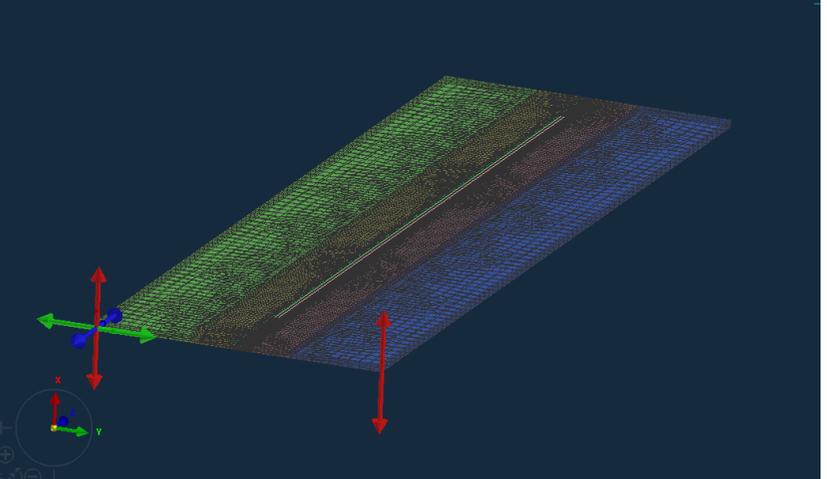
Nota: Os valores admitidos para a energia por unidade de comprimento e rendimento do processo são meramente experimentais, sendo com eles obtidos a forma do cordão de soldadura ideal.

A área de transferência de calor por convecção considerada em *Sysweld* é semelhante à figura 2 da Tabela 36.

Condições de fixação: Na dúvida relativamente às condições reais de fixação, procurou-se encontrar um modelo que reproduzisse da melhor forma os efeitos da deformada obtidos por via do ensaio experimental. Como foi referido que a peça arrefeceria livremente após 30 segundos, cada condição de fixação foi dividida em duas etapas, sendo a primeira relativa às condições de fixação ocorridas desde a realização do cordão de soldadura até à remoção dos parafusos e a segunda etapa relativa ao arrefecimento livre das chapas. Neste arrefecimento livre, 3ª coluna da Tabela 67, fixaram-se dois nós da peça de forma à chapa não se deslocar para o infinito no *software*.

A condição de fixação 1, Tabela 67, procura ilustrar as condições visíveis na Figura 217 e Figura 218. Contudo, desconhecendo com precisão a prática utilizada na oficina para fixação das chapas, considerou-se uma simplificação dessas condições, representada como a condição de fixação 2, Tabela 67.

Tabela 67 - Condições de fixação do modelo experimental

	Instante 0-30 segundos	Instante 30-60 segundos
Condição de fixação 1		
Condição de fixação 2		

5.3 Campo de deslocamentos

Os deslocamentos normais são obtidos para o instante de deformação final (60 segundos). O campo de deformações é exclusivo de cada figura, dados os diferentes espectros apresentados.

Tabela 68 - Campo de deslocamentos Ensaio 1

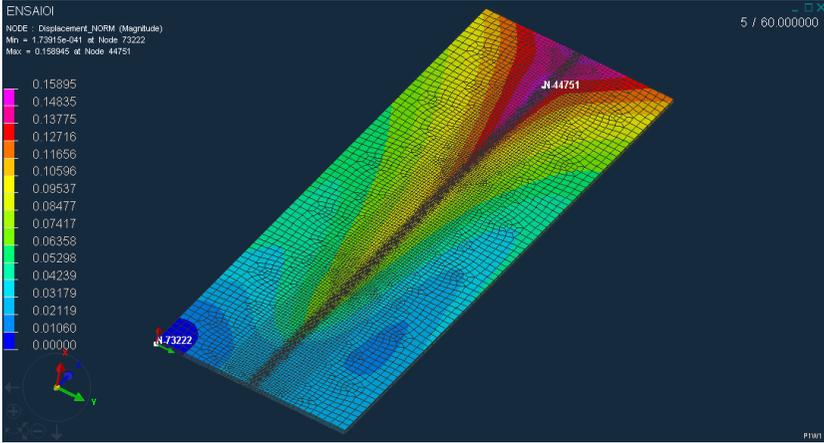
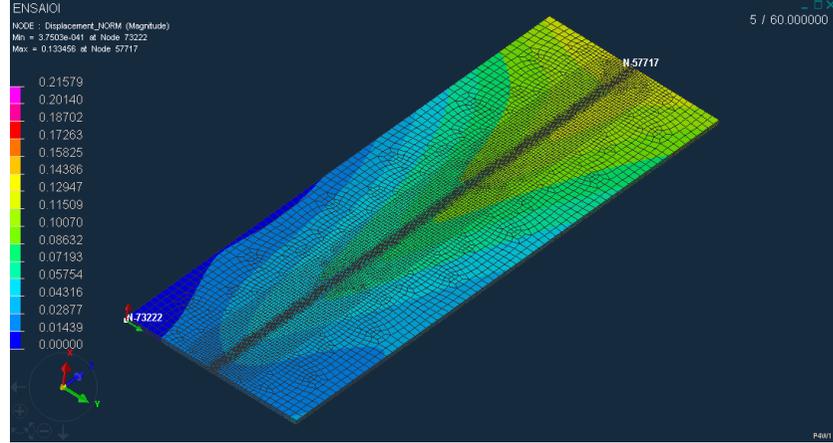
Ensaio I	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
<p><i>Sysweld</i></p>	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.73915e-041 at Node 73222 Max = 0.158945 at Node 44751</p> <p>0.15895 0.14835 0.13775 0.12716 0.11656 0.10596 0.09537 0.08477 0.07417 0.06358 0.05298 0.04239 0.03179 0.02119 0.01060 0.00000</p>	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.7503e-041 at Node 73222 Max = 0.133959 at Node 57717</p> <p>0.21579 0.20140 0.18702 0.17263 0.15825 0.14386 0.12947 0.11509 0.10070 0.08632 0.07193 0.05754 0.04316 0.02877 0.01439 0.00000</p>

Tabela 69 - Campo de deslocamentos Ensaio VII

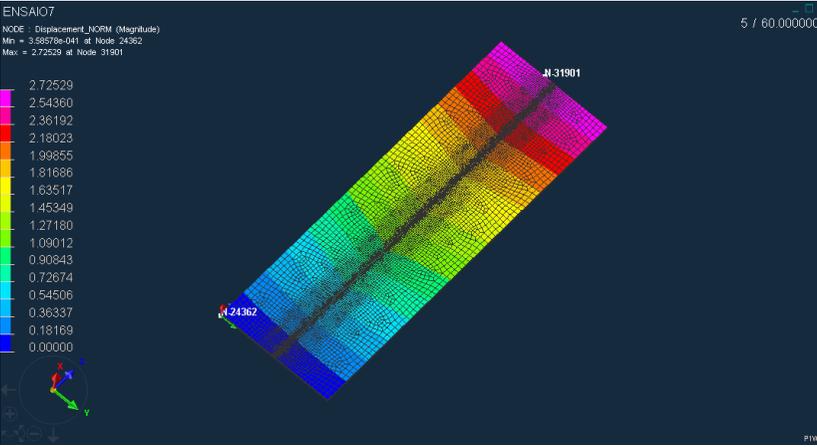
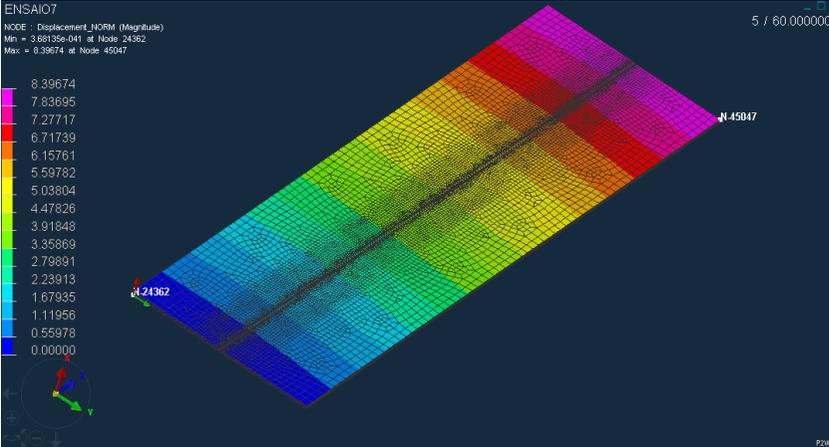
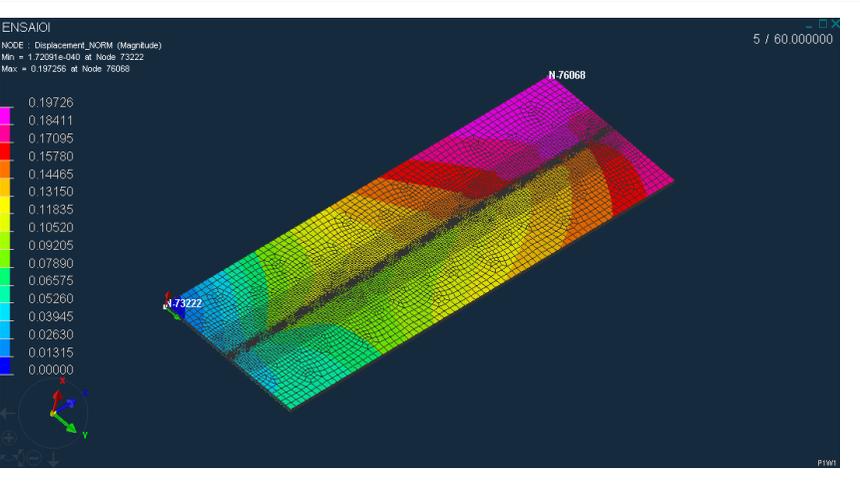
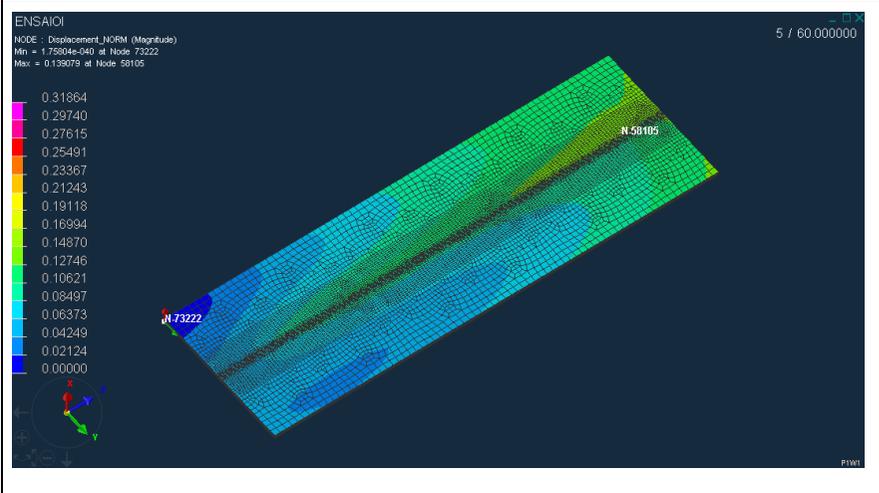
Ensaio VII	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
Sysweld	 <p>ENSAIO7 NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.58578e-041 at Node 24362 Max = 2.72529 at Node 31901</p>	 <p>ENSAIO7 NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.68135e-041 at Node 24362 Max = 8.39674 at Node 45047</p>

Tabela 70 - Campos de deslocamentos Ensaio VIII

Ensaio VIII	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
Sysweld	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.72091e-040 at Node 73222 Max = 0.197256 at Node 76068</p> <p>5 / 60.000000</p> <p>0.19726 0.18411 0.17095 0.15780 0.14465 0.13150 0.11835 0.10520 0.09205 0.07890 0.06575 0.05260 0.03945 0.02630 0.01315 0.00000</p> <p>N 73222 N 76068</p>	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.75904e-040 at Node 73222 Max = 0.318678 at Node 50105</p> <p>5 / 60.000000</p> <p>0.31864 0.29740 0.27615 0.25491 0.23367 0.21243 0.19118 0.16994 0.14870 0.12746 0.10621 0.08497 0.06373 0.04249 0.02124 0.00000</p> <p>N 73222 N 50105</p>

5.4 Distribuição de deslocamentos

Tabela 71 - Deslocamentos normais Ensaio I

Ensaio I	Magnitude de deslocamentos em sentido transversal a meio da placa	Magnitude de deslocamentos ao longo do cordão de soldadura
Condição de fronteira 1		
Condição de fronteira 2		

Tabela 72 - Deslocamentos normais Ensaio VII

Ensaio VII	Magnitude de deslocamentos em sentido transversal a meio da placa	Magnitude de deslocamentos ao longo do cordão de soldadura
Condição de fronteira 1	<p>Gráfico de deslocamento normal (mm) versus distância (mm) para a condição de fronteira 1, sentido transversal. O eixo Y varia de 1.2 a 1.4 mm, e o eixo X de 0 a 40 mm. A curva 'Topo' mostra um deslocamento que aumenta de ~1.21 mm a 0 mm até um pico de ~1.38 mm a 22 mm, e depois diminui para ~1.31 mm a 40 mm.</p>	<p>Gráfico de deslocamento normal (mm) versus distância (mm) para a condição de fronteira 1, ao longo do cordão de soldadura. O eixo Y varia de 0 a 3 mm, e o eixo X de 0 a 120 mm. A curva 'Topo' mostra um deslocamento que aumenta linearmente de ~0.1 mm a 0 mm até ~2.6 mm a 120 mm.</p>
Condição de fronteira 2	<p>Gráfico de deslocamento normal (mm) versus distância (mm) para a condição de fronteira 2, sentido transversal. O eixo Y varia de 4.32 a 4.64 mm, e o eixo X de 0 a 40 mm. A curva 'Topo' mostra um deslocamento que flutua entre 4.32 e 4.48 mm até 20 mm, depois sobe para ~4.64 mm a 40 mm.</p>	<p>Gráfico de deslocamento normal (mm) versus distância (mm) para a condição de fronteira 2, ao longo do cordão de soldadura. O eixo Y varia de 0 a 10 mm, e o eixo X de 0 a 120 mm. A curva 'Topo' mostra um deslocamento que aumenta linearmente de ~0.2 mm a 0 mm até ~8.2 mm a 120 mm.</p>

Tabela 73 - Deslocamentos normais Ensaio VIII

Ensaio VIII	Magnitude de deslocamentos em sentido transversal a meio da placa	Magnitude de deslocamentos ao longo do cordão de soldadura
Condição de fronteira 1		
Condição de fronteira 2		

No Ensaio I, os deslocamentos máximos são obtidos no último terço da placa (direcção longitudinal ao cordão de soldadura), sendo estes maiores na zona do cordão de soldadura, Tabela 68. Os dois casos de fixação apresentam valores de deslocamento normais semelhantes apesar do espectro de cores apresentado ser diferente. Da Tabela 71 é possível verificar a mesma ordem de grandeza dos deslocamentos, bem como uma distribuição dos mesmos semelhante. Em relação aos deslocamentos longitudinais, seguem a mesma ordem de grandeza e a mesma distribuição para as duas condições de fixação, excepção feita a um maior incremento do valor do deslocamento no primeiro terço da placa na 1ª condição de fixação.

No Ensaio VII, Tabela 69 e Tabela 72, a evolução dos deslocamentos normais na transversal da placa é crescente em relação ao sentido da largura da placa para o caso de fixação 2. No caso de fixação 1, a distribuição desses deslocamentos é semelhante aos obtidos para o Ensaio I, tendo o máximo dos deslocamentos sido alcançado na região do cordão de soldadura. A diferença a nível de valores máximos é notória, sendo cerca de 1,4mm para a condição de fixação 1 e de 4,6 mm para o caso de fixação 2. Longitudinalmente, a variação dos deslocamentos normais segue uma distribuição linear sendo os valores máximos obtidos para o caso de fixação 2 (cerca 8mm, face aos 2,6 mm do caso de fixação 1).

No Ensaio VIII, Tabela 70 e Tabela 73, os deslocamentos normais são mais elevados na zona da liga de Alumínio 5083. Na transversal ao cordão de soldadura, a distribuição indica, para além de maiores deslocamentos na zona da liga de Alumínio 5083, uma transição do valor dos deslocamentos na região do cordão de soldadura, com a liga de Alumínio 6082 a oferecer maior resistência às movimentações decorrentes da soldadura. Longitudinalmente ao cordão de soldadura, a evolução dos deslocamentos ocorre de igual forma, sendo os valores ligeiramente superiores no caso da condição de fixação 1

5.5 Comparação das deformadas

As deformadas analisadas apresentam uma razão de ampliação de 25x de forma a poderem ser visíveis os efeitos das condições de fronteira em cada chapa

Tabela 74 - Deformadas Ensaio I, factor de ampliação 25x

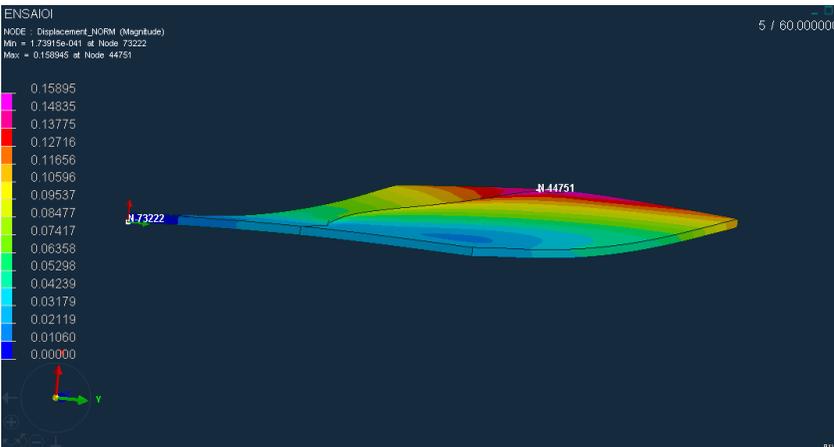
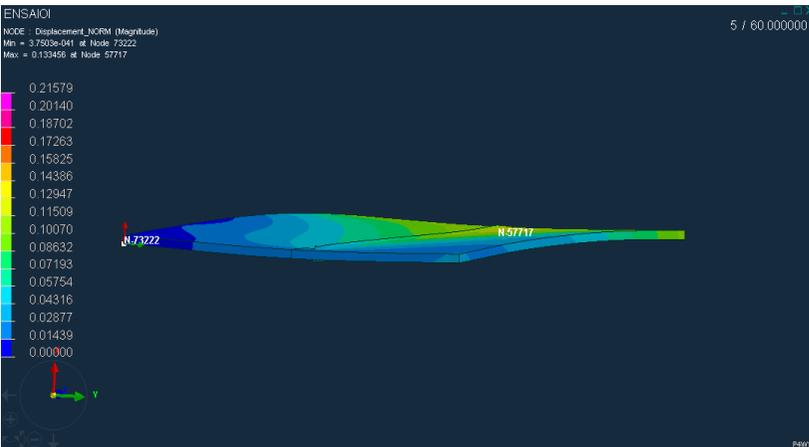
Ensaio I	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
<p><i>Sysweld</i></p>		

Tabela 75 - Deformadas Ensaio VII, factor de ampliação 25x

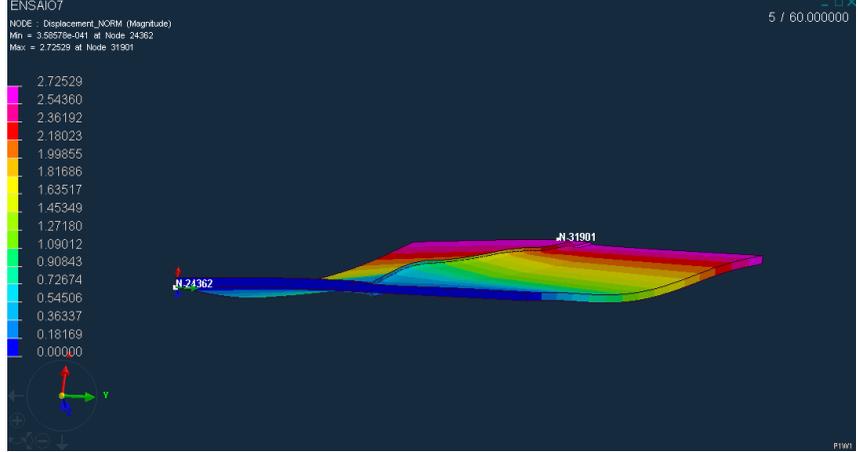
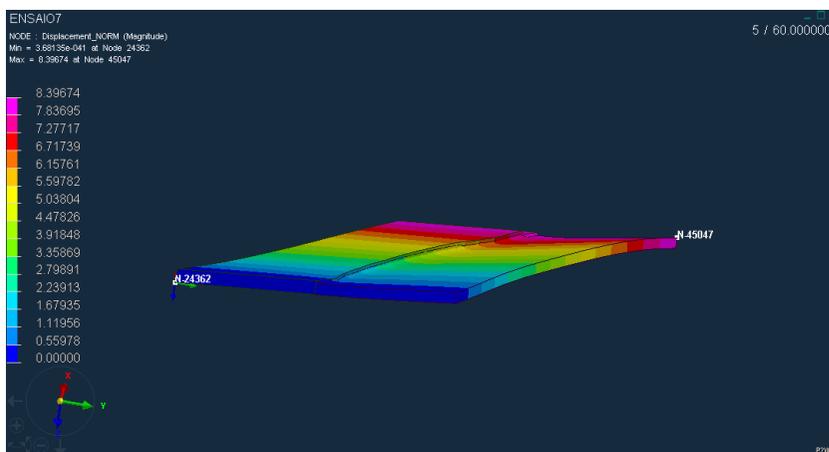
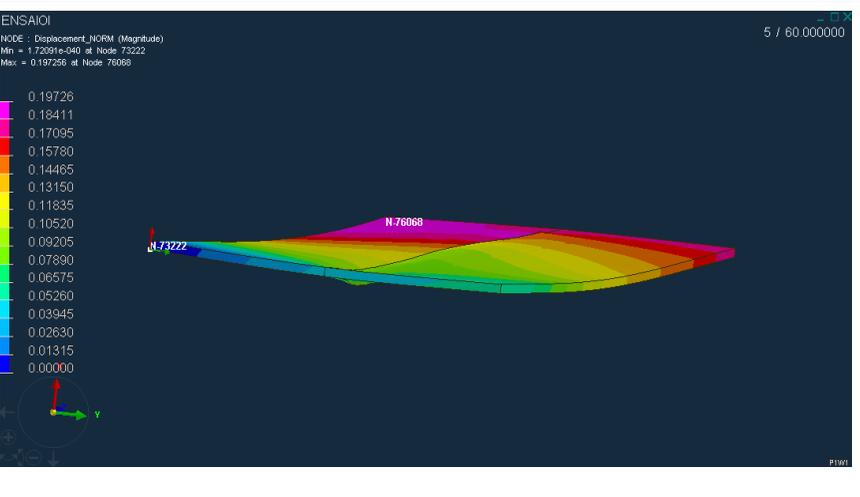
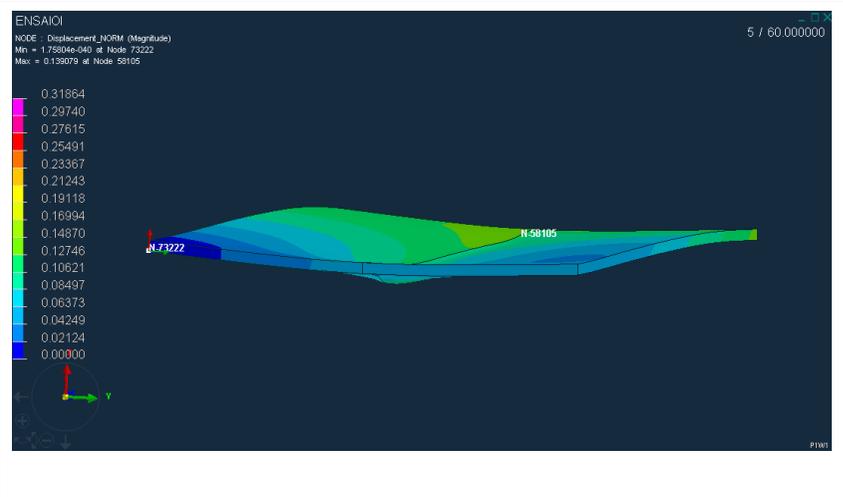
Ensaio VII	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
Sysweld	<p>ENSAIO7 NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.58578e-041 at Node 24362 Max = 2.72529 at Node 31901</p> 	<p>ENSAIO7 NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 3.68135e-041 at Node 24362 Max = 8.39674 at Node 45047</p> 

Tabela 76 - Deformadas Ensaio VIII, factor de ampliação 25x

Ensaio VIII	Condição de fixação 1	Condição de fixação 2
Sysweld	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.72031e-040 at Node 73222 Max = 0.197256 at Node 76068</p> <p>5 / 60.000000</p> <p>0.19726 0.18411 0.17095 0.15780 0.14465 0.13150 0.11835 0.10520 0.09205 0.07890 0.06575 0.05260 0.03945 0.02630 0.01315 0.00000</p>	 <p>ENSAIOI NODE : Displacement_NORM (Magnitude) Min = 1.75806e-040 at Node 73222 Max = 0.132079 at Node 58105</p> <p>5 / 60.000000</p> <p>0.31864 0.29740 0.27615 0.25491 0.23367 0.21243 0.19118 0.16994 0.14870 0.12746 0.10621 0.08497 0.06373 0.04249 0.02124 0.00000</p>

As ténues condições de equilíbrio de placas finas originam deformadas incertas. No caso das chapas obtidas experimentalmente, todas elas flectiram convexamente. Foi procurada encontrar uma relação entre as condições de fixação e a deformada obtida. Consultando as figuras da Tabela 74, Tabela 75 e Tabela 76, extraídas de Sysweld com um factor de ampliação de 25x, é notório que para o segundo caso de fixação as deformadas coincidem com as obtidas por via experimental. Todas as deformadas do primeiro caso de fixação apresentam o sentido oposto. De salientar o Ensaio VII (dupla espessura) em que a condição de fixação 2 apresenta os resultados mais próximos ao obtido nos provetes.

5.6 Distribuição de tensões residuais esperadas

Não sendo possível proceder à validação do campo de tensões residuais nesta dissertação, efectuam-se as previsões das mesmas com recurso a *Sysweld*. Apenas serão contabilizadas as tensões segundo Z (ao longo da largura da placa) e segundo Y (ao longo do comprimento da placa). Dada a semelhante construção entre o modelo do caso experimental e do caso de estudo 3D, para as tensões segundo Z, é considerada uma secção de corte a 1/3 da peça (Secção de corte 1) como foi ilustrado na Figura 178.

A verde estão representados os valores relativos ao topo da placa e a vermelho à base.

No ensaio de dupla espessura (Ensaio VII), as tensões residuais são obtidas à superfície, apesar de existir a diferença de espessura que impossibilita traçar um caminho recto.

Tabela 77 - Tensões residuais zz e yy Ensaio I

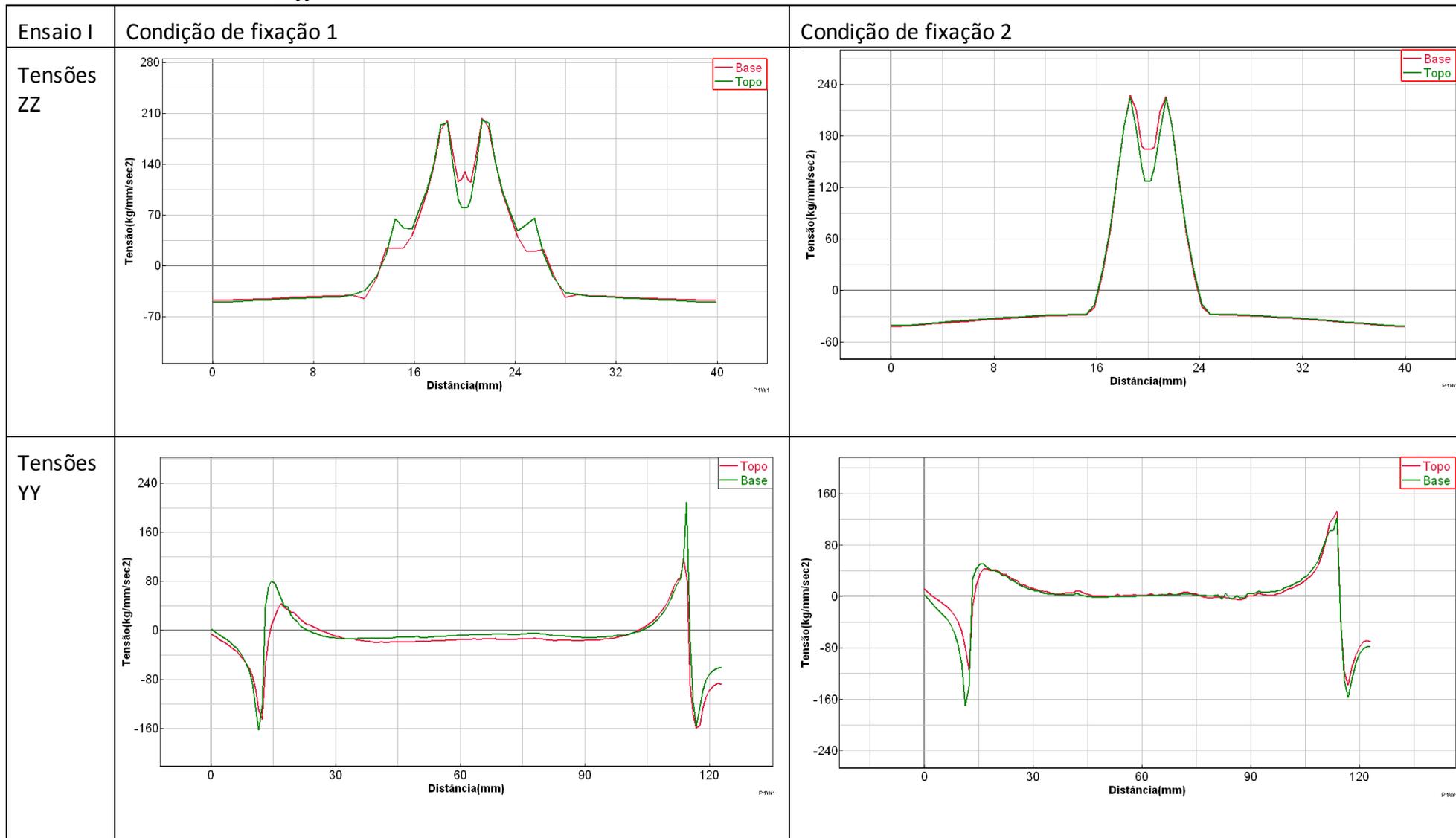


Tabela 78 - Tensões residuais zz e yy, Ensaio VII

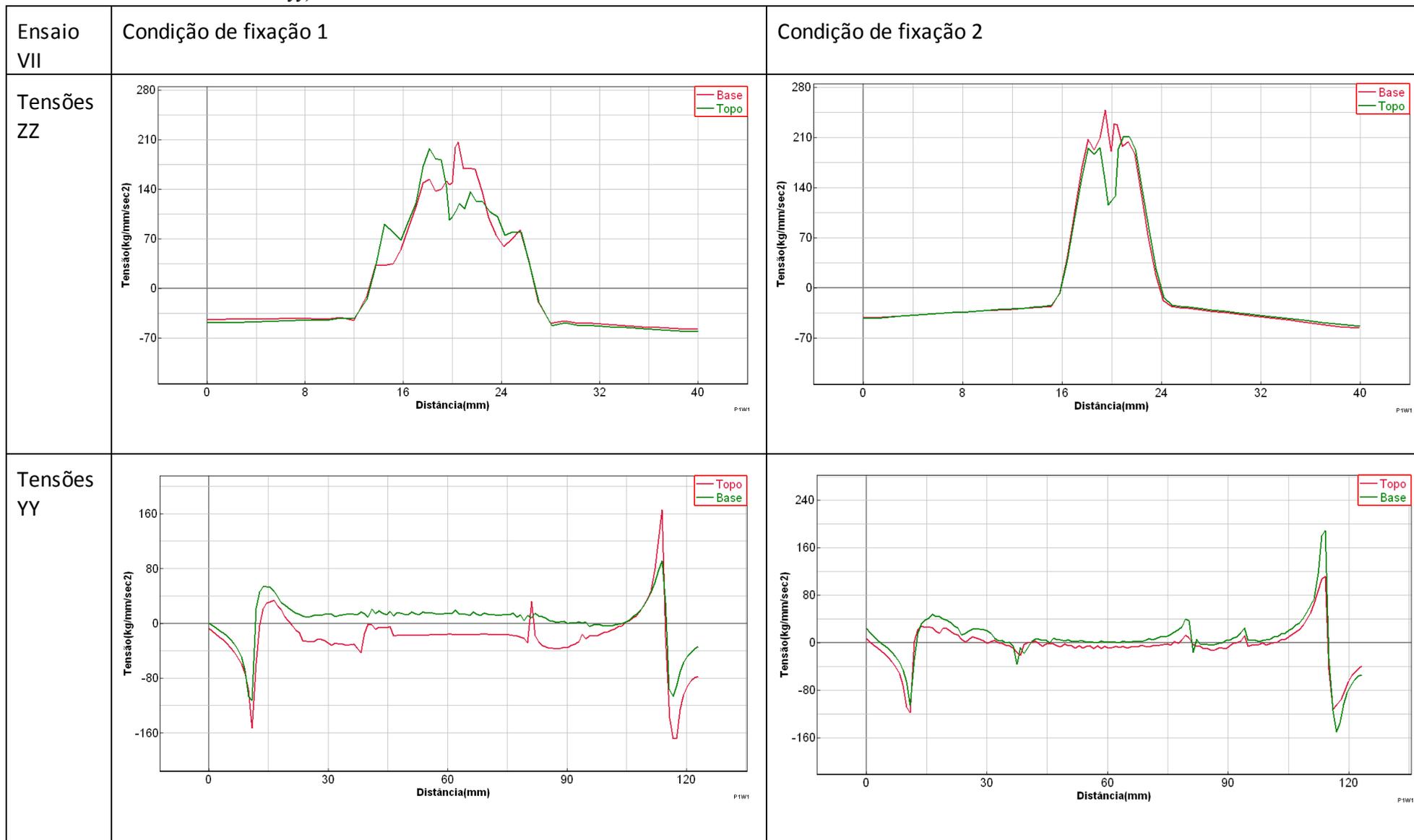
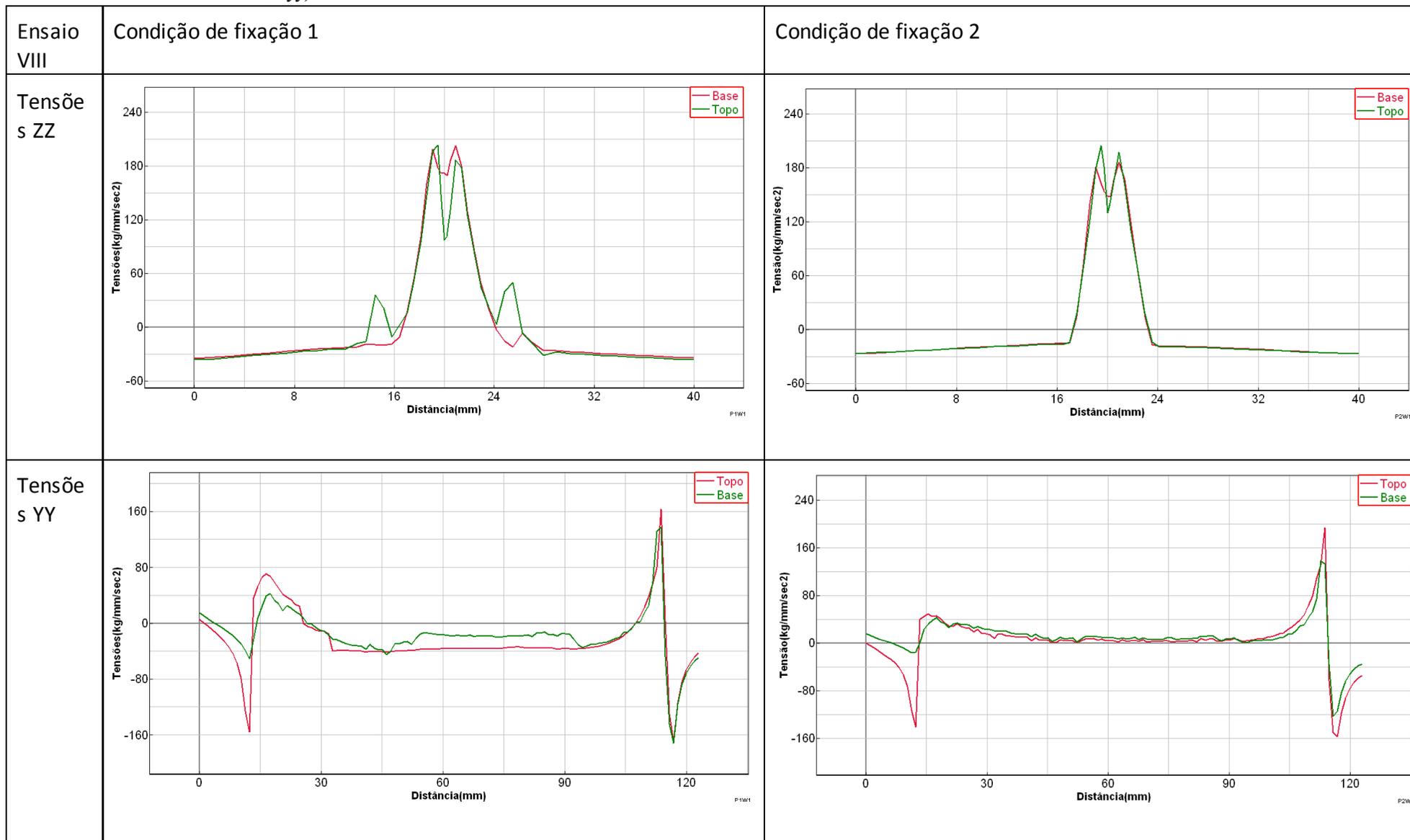


Tabela 79 - Tensões residuais zz e yy, Ensaio VIII



As tensões residuais zz no Ensaio I, Tabela 77 seguem a distribuição já anteriormente discutida para o caso de estudo 2D e 3D. É de referir que face à maior área de restrição de movimento da condição de fixação 1, as tensões ao longo da largura da placa se alastrem ao longo de uma maior região, embora o valor máximo das tensões seja inferior quando comparado com o obtido para a condição de fixação 2. As tensões yy ao longo do comprimento do cordão de soldadura são equivalentes nos dois casos, sendo de registar um pico de tensão ocorrido para o primeiro caso de fixação no último terço do topo da placa.

No Ensaio VII, as tensões zz mais elevadas ocorrem no topo para a placa de 1 mm de espessura e na base para a placa de 0,8 mm de espessura (condição de fixação 1). Para a condição de fixação 2, as tensões residuais zz são simétricas, sendo o valor máximo obtido para a base da chapa. Comparativamente com a condição de fixação 1, as tensões máximas segundo zz apresentam valores mais elevados (250 MPa face a 210 MPa). Longitudinalmente, para a condição de fixação 1, as tensões residuais yy apresentam valores de compressão ao longo de grande parte do cordão de soldadura, enquanto que para a condição de fixação 2, esses valores são neutros.

As tensões residuais do Ensaio VIII seguem a mesma lógica das obtidas para o Ensaio I. Diferem sobretudo nas tensões residuais yy ao longo do cordão de soldadura para a primeira condição de fixação, apresentando valores de compressão ao longo do cordão de soldadura. Na condição de fixação 2, esses valores apresentam-se neutros.

A existência de tensões de compressão yy ao longo do cordão de soldadura tem influência na direcção da deformação das chapas, sendo estas de pequena espessura e muito susceptíveis a alterações da sua posição de equilíbrio. Sendo estas tensões neutras como na segunda condição de fixação, a chapa toma uma deformada convexa sendo que na primeira condição de fixação face às tensões de compressão existentes, a deformada apresenta-se côncava.

6. Conclusões e sugestões para trabalho futuro

Em conclusão:

- A comparação entre os modelos 2D e 3D para uma ligação topo a topo revelou concordância satisfatória na medida em que se obtém um campo de tensões residuais zz aproximado, bem como uma análise das variações de fase química semelhantes. Relativamente às tensões residuais zz , a comparação apenas poderá ser válida para secções de corte a meio da chapa, já que na face inicial a distribuição de tensões alcançada não obedece à obtida no modelo 2D.
- Para uma análise de uma ligação simples como a descrita nesta dissertação, será mais benéfica a utilização do modelo 2D se se pretender apenas uma análise de tensões residuais zz . Esta escolha prende-se com o facto de o tempo de processamento ser muito inferior ao do modelo 3D. Face às limitações do modelo 2D, onde apenas se poderão extrair resultados para uma secção de corte, o modelo 3D é de uma complexidade muito mais elevada mas para soluções que exijam a determinação de um maior número de variáveis, será a melhor opção.
- Em relação à análise térmica, para ambos os modelos calibrados existe uma discrepância assinalável em relação às temperaturas máximas obtidas no topo das chapas. Contudo a evolução temporal das temperaturas é próxima nos dois modelos. As áreas de transferência de calor por convecção consideradas na análise do modelo 3D não têm influência quanto à distribuição do perfil de temperaturas ao longo da placa.
- A comparação do campo de deslocamentos do modelo 3D em *Sysweld* e *Weld Planner* não foi satisfatória. Factores como a falta de calibração do modelo em *Weld Planner*, os reduzidos dados quanto aos parâmetros de soldadura e a simplicidade de processamento do *software*, conduziram a resultados totalmente distintos dos obtidos em *Sysweld*.
- No caso experimental modelado em *Sysweld*, o tipo de condição de fronteira altera a distribuição das tensões residuais e por sua vez a direcção da deformada. Para tensões de compressão yy ao longo do cordão de soldadura a deformada toma a forma côncava. Quando essas tensões são neutras, a deformada da placa toma a forma convexa (coincidente com o obtido experimentalmente).
- O campo de tensões residuais zz vêm na sequência do obtido quer para o caso de estudo 2D e 3D, sendo alterado pelas diferentes propriedades de material e geométricas das chapas analisadas.

Como sugestões para trabalho futuro, referem-se as seguintes:

- Realização de uma análise da microestrutura das chapas ensaiadas de forma a determinar com exactidão as dimensões do cordão de soldadura.

- Criação de múltiplas etapas de soldadura em *Sysweld* de forma a simular as variações de velocidade de soldadura do processo real.
- Validar o campo de tensões residuais e o campo de deslocamentos normais.
- Quantificação de deslocamentos angulares.
- Calibração do modelo 3D em *Weld Planner*.
- Introdução de condições de contacto em *Sysweld*, simulando os efeitos da transferência de calor por condução da chapa na mesa de soldadura.
- Realizar um estudo da dureza do cordão de soldadura e zona termicamente afectada.

Bibliografia

- [1] ESI Group, Weld Distortion and Weld Quality Simulation. Benefits, Capabilities and Products, Sysweld Toolbox 2010.
- [2] Landolt-Börnstein. Steel symbol/number: S355J2G3/1.0570.
- [3] Howard B.Cary. (1998) www.millerwelds.com/resources/articles/welding-history/. Excerpto de Modern Welding Technology, 4th edition, Prentice-Hall.
- [4] The Welding Institute, *Welding Course for ICST and CUED Post-Graduate Students*, 1975.
- [5] British Standard BS499-1, Welding terms and symbols. Part 1: Glossary for welding, brazing and thermal cutting, 1991.
- [6] Dmitri Kopeliovich. SubSTech, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=solid_state_welding_ssw.
- [7] Valery Marinov. Western Mediterranean University. Department of Mechanical Engineering. http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_combining_fusion.pdf.
- [8] Xin Sun, Failure mechanisms of advanced welding processes. Solid state joining: fundamentals of friction stir welding. Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [9] Wikipedia, Diffusion Welding, http://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_welding.
- [10] Wikipedia, Plasma Arc Welding, http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_arc_welding.
- [11] L.Quintino et al., "Laser Welding of Structural Aluminium", in: Pedro M. G. P. Moreira, et al. eds., "Structural Connections for Lightweight Metallic Structures", Springer, 2012.
- [12] E.Couso et al., "Laser Beam Welding and Automotive Engineering", in: Pedro M. G. P. Moreira, et al. eds., "Structural Connections for Lightweight Metallic Structures", Springer, 2012.
- [13] Koichi Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, chapter: "Heat Flow in Weldments", Pergamon, 1980.
- [14] Thomas W. Edgar, *Energy Sources Used for Fusion Welding*. Massachusetts Institute of Technology.
- [15] Eagle Group, Laser Welding <http://www.eagle-group.eu/en/laser-welding>.
- [16] Horácio Guimarães Delgado Junior, José Adilson de Castro Carlos Roberto Xavier, Numerical evaluation of the weldability of the low alloy ferritic steels T/P23 and T/P24, Materials Research vol.14, 2011, <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392011005000019>.
- [17] Marek Ziolkowski, "Modelling of Seebeck effect in electron beam deep welding of dissimilar metals," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol.28, pp.140-153, 2009.
- [18] ESI Group, Sysweld Theoretical Presentation, Heat Sources for Welding, Sysweld Toolbox 2011, 2005.

- [19] J.Zhou, H.L.Tsai, "Welding Heat Transfer", in: Z.Feng, ed., "Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion", Woodhead Publishing Publishing, 2005.
- [20] Cranfield Institute of Technology, "Heat Flow in Fusion Butt Welding," vol. Lecture notes No.69.
- [21] T.Inoue, "Thermal–metallurgical–mechanical interactions during welding", in: "Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion", Woodhead Publishing Publishing, 2005.
- [22] Canadian Welding Bureau, *Welding for Design Engineeres*, Welding Metallurgy. Gooderham Centre for Industrial Learning, 2006.
- [23] Koichi Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, chapter: "Fundamental Information on Residual Stresses", Pergamon, 1980.
- [24] Canadian Welding Bureau, *Welding for Design Engineeres*, Residual Stress and Distortion. Gooderham Centre for Industrial Learning, 2006.
- [25] José Paulo Silveira, *Soldagem*, Petrobrás - Petróleo Brasileiro S.A. - Serviço de Pessoal ed, s.data.
- [26] Koichi Masubuchi, *Analysis of Welded Structures*, chapter: "Distortion in Weldments", Pergamon, EUA, 1980.
- [27] S. Nadimi, R.J. Khoushehmeh, B. Rohani and A. Mostafapour. Investigation and Analysis of Weld Induced Residual Stresses in Two Dissimilar Pipes by Finite Element Modeling. *Journal of Applied Sciences*, vol.8, pp.1014-1020, 2008, <http://scialert.net/abstract/?doi=jas.2008.1014.1020>.
- [28] A. Youtsos, C. Ohms, JRC,European Commission, NDT Based on Neutron Techniques in Support of Structural Integrity Assessment, 3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Nov 14-16, 2001.
- [29] Dean Deng, Hidekazu Murakawa, Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint, *Computational Materials Science*, Vol 43, pages 353–365, August 2008.
- [30] ESI Group Hispania, Weld Planner, Simulación de distorsión en soldadura basada en la contracción.
- [31] ESI Group, Frederic Boitout, Damian Dry, Philippe Mourgue, Harald Porzner, Yogendra Gooroochurn, Transient Simulation of Welding Processes Thermal, Metallurgical and Structural Model, Sysweld V2004.
- [32] ESI Group, Sysweld Simulation of the Physics of Welding, Sysweld Presentation.
- [33] ESI Group, Visual Mesh 9.5 User's Guide, Automesh Surfaces, point 10.
- [34] ESI Group, Technical Description of Capabilities, Sysworld, 2005.
- [35] Jinu Paul, Casting, Forming and Welding, Welding Lecture 9, Heat Flow in Welds. <http://pt.slideshare.net/nishant1064/welding-lectures-9-10#>.
- [36] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Example for an analytical model for energy input following Goldak, April 2014.
- [37] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Heat Sources for Welding. Heat Treatment Welding, Simulation Modeling Physics.
- [38] S.Bag, A.De, "Computational modelling of conduction mode laser welding process", in: Xiaodong Na ed., "Laser Welding", Sciy, ISBN 978-953-307-129-9, 2010.

[39] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Heat Sources for Welding. Strain Rate Partition, Simulation Modeling Physics.

[40] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Thermal and Metallurgical Strain, Simulation Modeling Physics.

[41] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Metallurgical Models, Simulation Modeling Physics.

[42] ESI Group, Welding Simulation Presentation, Mesh density in the molten zone, April 2014.