



METODOLOGIA DE TAGUCHI NA PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDADURA POR PONTOS EM LIGAÇÕES DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES

GONÇALO MANUEL NEVES MADUREIRA DE ABREU AMORIM

julho de 2023

METODOLOGIA DE TAGUCHI NA PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDADURA POR PONTOS EM LIGAÇÕES DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES

Gonçalo Manuel Neves Madureira de Abreu Amorim

2022/23

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

METODOLOGIA DE TAGUCHI NA PARAMETRIZAÇÃO DA SOLDADURA POR PONTOS EM LIGAÇÕES DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES

Gonçalo Manuel Neves Madureira de Abreu Amorim

1180977

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor António Gonçalves Magalhães.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

O presente relatório contou com a colaboração de diversas pessoas, sendo necessário destacar algumas em particular pelo esforço e tempo disponibilizado.

Em primeiro lugar um agradecimento especial ao Engenheiro António Magalhães por toda a orientação e ajuda disponibilizada, não só ao longo do desenvolvimento deste relatório, como ao longo de todo o meu processo académico.

À Engenheira Sandra Ramos pela ajuda disponibilizada no desenvolvimento e obtenção de resultados no Método de Taguchi.

Na parte prática destaco a Engenheira Fátima Andrade, na execução dos ensaios de corte e medições de microdureza, e aos Engenheiros Vítor Ribeiro e Vítor Moreira pela disponibilidade e ajuda na utilização dos diferentes equipamentos de corte e soldadura necessários à realização deste trabalho.

página propositadamente em branco

RESUMO

A presente dissertação tem como principal objetivo a realização de um estudo de otimização de parâmetros no processo de soldadura por pontos em dois materiais, aço St12 e alumínio 1050, com base no Método de Taguchi. Este processo consiste na ligação de dois componentes, normalmente em chapa, através de uma corrente elétrica transmitida por dois elétrodos, sendo este um processo de rápida aplicação e desta forma, de elevada importância nas indústrias automóvel e aeroespacial. Na revisão do estado da arte foi estudado o funcionamento do processo, assim como as suas principais variantes, vantagens e desvantagens. Posteriormente, e de forma a permitir um aprofundamento da componente prática, foi realizada uma revisão sobre os métodos de ensaio, destrutivos e não destrutivos, aplicáveis neste tipo de juntas e formas de avaliar a qualidade da soldadura resultante. A escolha do ensaio de submissão do ponto de soldadura a um esforço de corte, foi a base para o posterior estudo dos parâmetros mais influentes no processo e a sua influência na resistência mecânica e microdureza, permitindo assim concluir os parâmetros mais importantes a estudar na componente prática, e as variáveis que se iriam posteriormente definir para este estudo. Um estudo do método de Taguchi aplicado a este processo de soldadura foi também realizado, uma vez que este método de análise estatística de resultados foi aplicado. O método de Taguchi permitiu, em ambos os materiais, identificar a melhor combinação de parâmetros a aplicar, sendo que ocorreu a variação de um dos parâmetros entre os diferentes materiais. A corrente de soldadura e tempo de soldadura foram mantidos sendo utilizada a espessura de chapa e a temperatura de pré-aquecimento como terceiros parâmetros selecionados para os materiais da família do aço e alumínio, respetivamente. O resultado comparador para os diferentes parâmetros aplicados no método de Taguchi foi a força máxima aos quais os provetes se encontraram sujeitos no ensaio de corte.

PALAVRAS-CHAVE

Soldadura; Taguchi; Parâmetros; Aço; Alumínio.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

The main objective of this dissertation is to carry out a study on the optimization of parameters in the spot-welding process in two materials, St12 steel and 1050 aluminium, based on the Taguchi Method. This process consists in the connection of two components, normally in sheet metal, through an electric current transmitted by two electrodes, being this a process of fast application and of high importance in the automotive and aerospace industries. In the review of the state of the art the operation of the process was studied, as well as its main variants, advantages, and disadvantages. Subsequently, and to allow a more profound study of the practical component, a review of the destructive and non-destructive test methods applicable to this type of joints and ways to evaluate the quality of the resulting weld was carried out. The choice of the welding point shear strength test was the basis for the subsequent study of the most influential parameters in the process and their influence in the mechanical resistance and microhardness, thus allowing the conclusion of the most important parameters to be studied in the practical component and the variables that would be defined later for this study. A study of the Taguchi method applied to this welding process was also carried out, as this method of statistical analysis of results was applied. The Taguchi method allowed, in both materials, to identify the best combination of parameters to be employed, with the variation of one of the parameters occurring between the different materials. Welding current and welding time were maintained and sheet thickness and preheating temperature were used as third selected parameters for the steel and aluminium family of materials respectively. The comparator result for the different parameters applied in the Taguchi method was the maximum force to which the specimens were subjected in the shear strength test.

KEYWORDS

Welding; Taguchi; Parameters; Steel; aluminium.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Objetivos	15
1.3. Metodologia	16
1.4. Estrutura do relatório.....	16
1.5. Local/Empresa de acolhimento.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Soldadura por pontos.....	17
2.1.1. Funcionamento	17
2.1.2. Aplicações	22
2.1.3. Vantagens e Desvantagens	22
2.1.4. Variantes do processo.....	23
2.1.5. Modos de rotura	25
2.1.6. Qualidade da soldadura – aspeto do “ <i>nugget</i> ” e defeitos existentes.....	26
2.1.7. Métodos não destrutivos de caracterização da soldadura.....	28
2.1.8. Métodos destrutivos de caracterização da soldadura.....	31
2.2. Parâmetros e a sua influência	34
2.2.1 Parâmetros ótimos com base em estudos realizados.....	42
2.3. Microestrutura	42
2.4. Microdureza	46
2.5. Influência dos pré-tratamentos superficiais	47
2.6. Método de Taguchi	48
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO	53
3.1. Ensaios complementares ao estudo	53
3.1.1. Comparação de tratamentos superficiais	53
3.1.2. Realização de dois pontos de soldadura	54
3.2. Preparação dos Provetes.....	56
3.2.1. Preparação superficial.....	57
3.2.2. Preparação das chapas pré-soldadura.....	59
3.3. Soldadura.....	60

3.3.1. Aço	61
3.3.2. Alumínio	63
3.4. Ensaios e Medições	65
3.4.1. Ensaios de Corte.....	65
3.4.2. Medições de Dureza.....	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1. Aço	69
4.1.1. Resultados	69
4.1.2. Método de Taguchi	78
4.2. Alumínio	85
4.2.1. Resultados.....	85
4.2.2. Método de Taguchi	92
4.2.3. Ensaios complementares realizados no alumínio 1050.....	98
5. CONCLUSÃO	101
5.1. Conclusões finais	101
5.2. Limitações e trabalhos futuros.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE A	111
APÊNDICE B	112
APÊNDICE C	113
APÊNDICE D.....	122
APÊNDICE E	123
APÊNDICE F.....	132
ANEXO A.....	133
ANEXO B	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama representativo do processo de RSW (“Resistance Spot Welding”). Adaptado de [3]	18
Figura 2 – Diferentes geometrias das ponteiros dos elérodos. Adaptado de [8]	19
Figura 3 – Geometrias complexas de elérodos. Adaptado de [8].....	19
Figura 4 – Comparação da estrutura de corte da zona central do ponto de soldadura para 3 elérodos: “pointed nose” (a), “truncated nose” (b) e “radius face” (c). Circunferências vermelhas representam as zonas de fratura. Adaptado de [9]	20
Figura 5 – Diagrama esquemático das diferentes etapas presentes no processo de soldadura por pontos. Adaptado de [7]	21
Figura 6 – Soldadura de pontos por roletes. Adaptado de [23].....	24
Figura 7 – Processo de Soldadura de pontos por projeção. Adaptado de [27]	24
Figura 8 – Modos de rotura ocorrentes nas soldaduras por pontos. Adaptado de [31]	26
Figura 9 – Gráfico de força por deslocamento para os dois modos principais de rotura ocorrente na soldadura por pontos. Adaptado de [30].....	26
Figura 10 – Caracterização de uma indentação da superfície do ponto de soldadura. Adaptado de [37]	27
Figura 11 – Visualização do aparecimento de poros e fendas na zona interna do ponto de soldadura. Adaptado de [39]	27
Figura 12 – Visualização do defeito de expulsão após submissão a um Ensaio de “Peel”. Adaptado de [43]	28
Figura 13 – Funcionamento de uma termografia por infravermelhos. Adaptado de [43]	29
Figura 14 – Resultados obtidos da realização de uma termografia por infravermelhos. Adaptado de [43]	30
Figura 15 – Comparação dos resultados obtidos no método de ultrassons (a), termografia por infravermelhos (b) e termografia por infravermelhos Lock-in (c). Adaptado de [53]	31
Figura 16 – Métodos de realização do ensaio de “Chisel” com base na norma ISO 10447:2006. Adaptado de [54]	32
Figura 17 – Ensaio de “Chisel” realizado em laboratório com base em chapas de 1,4 mm de DP 3500/600. Adaptado de [55].....	32
Figura 18 – Métodos de realização do ensaio de “Peel” com base na norma ISO 10447:2006. Adaptado de [54]	33
Figura 19 – Representação esquemática dos ensaios de “Shear Tensile Strenght” (a) e “Direct Tensile Strenght” (b). Adaptado de [1], [20]	33
Figura 20 – Representação esquemática do ensaio de “Roller Peel”. Adaptado de [31]	34
Figura 21 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do elédrodo com a variação da força aplicada nos elérodos. Adaptado de [61].....	35
Figura 22 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do elédrodo com a variação da intensidade de corrente. Adaptado de [61].....	36
Figura 23 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do elédrodo com a variação do tempo de soldadura. Adaptado de [61].....	37
Figura 24 – Fenómeno de desvio de corrente elétrica no processo de soldadura por pontos. Adaptado de [65]	39

Figura 25 – Corte na zona central do ponto de soldadura realizado em alumínio 2219 com 22,4 kA de intensidade de corrente, 6 ciclos de tempo de soldadura e espaçamento entre pontos de 5 mm (a) e 20 mm (b). Imagens macroscópicas apresentam ampliação de 25x e microestruturas de 500x. Linha tracejada representa uma aproximação entre a fronteira do “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ). Adaptado de [67]	39
Figura 26 – Corte na zona central do ponto de soldadura realizado em alumínio 2219 com 25,3 kA de intensidade de corrente, 6 ciclos de tempo de soldadura e espaçamento entre pontos de 5 mm (a) e 20 mm (b). Imagens macroscópicas apresentam ampliação de 25x e microestruturas de 500x. Linha tracejada representa uma aproximação entre a fronteira do “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ). Adaptado de [67]	40
Figura 27 – Variação do diâmetro de “nugget” de soldadura para o ponto inicial, “shunt”, e o ponto de desvio de corrente, “shunted”, com diferentes espaçamentos entre ambos: (a) 12 mm; (b) 16 mm; (c) 20 mm; (d) 24 mm; (e) 28 mm; (f) 40 mm	41
Figura 28 – Variação do diâmetro do “nugget” com a distância entre pontos de soldadura. Adaptado de [65]	41
Figura 29 – Microestrutura proveniente da soldadura por pontos de chapas de 0,8 mm em aço de baixo carbono: material de base (a); Zona central do ponto de soldadura (b). Adaptado de [30]	43
Figura 30 – Imagens da microestrutura resultante entre a soldadura por pontos de duas ligas de aço dissimilares, aço inoxidável (zona superior) e aço de baixa liga (zona inferior). Adaptado de [61]	43
Figura 31 – Imagens obtidas através do Microscópio de Varrimento Eletrónico (aproximação de 500x) da secção de corte do ponto de soldadura demonstrando o “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ); 23,5 kA de intensidade de corrente e 6 ciclos de soldadura; espaçamento entre pontos: 5 mm(a); 20 mm (b). Adaptado de [67]	44
Figura 32 – Imagens obtidas através do Microscópio de Varrimento Eletrónico (aproximação de 500x) da secção de corte do ponto de soldadura demonstrando o “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ); 25,3 kA de intensidade de corrente e 6 ciclos de soldadura; espaçamento entre pontos: 5 mm(a); 20 mm (b). Adaptado de [67]	44
Figura 33 – Imagens da macroestrutura e microestrutura do seção central do ponto de soldadura realizado em ligas de alumínio dissimilares de 2195 (espessura 4 mm) e 5A06 (espessura 2 mm). Adaptado de [72]	45
Figura 34 – Aplicação de um PWIT (“Post Weld Impact Treatment”) no ponto de soldadura. Adaptado de [4]	46
Figura 35 – Gráfico de medição de dureza em Vickers ao longo das diferentes zonas de microestrutura presentes no ponto de soldadura. Adaptado de [30]	47
Figura 36 – Efeito da aplicação de um ataque químico na superfície de uma chapa de alumínio de AA5042. Adaptado de [76].....	48
Figura 37 – Gráfico representativo dos efeitos dos fatores de controlo para os diferentes níveis com base no rácio S/N. Adaptado de [71]	51
Figura 38 – Visualização da zona interna do ponto de soldadura (a) e do entalhe (b) após a quebra da ligação soldada nas chapas de alumínio que sofreram limpeza superficial com acetona.....	54
Figura 39 – Visualização da zona interna do ponto de soldadura (a) e do entalhe (b) após a quebra da ligação soldada nas chapas de alumínio que sofreram granalhagem.....	54

Figura 40 – Espaçador referente à marcação dos dois pontos de soldadura, representação em Software Solidworks (a), e após impressão 3D, (b)	55
Figura 41 – Representação esquemática da realização da soldadura das chapas com dois pontos de soldadura	55
Figura 42 – Marcação dos pontos de soldadura e linhas de sobreposição nos provetes realizados com dois pontos de soldaduras	56
Figura 43 – Provette de aço St12 realizado com base nos parâmetros de (4) do método de Taguchi após submetido ao ensaio de corte	56
Figura 44 – Equipamento de corte – ADIRA GM 0410	58
Figura 45 – Superfície das chapas de aço St12 antes (a) e após (b) a remoção dos óxidos com recurso a uma lixa de gramagem 500	58
Figura 46 – Espaçador referente à marcação do ponto de soldadura, representação em Software Solidworks (a), e após impressão 3D, (b)	59
Figura 47 – Representação esquemática da realização da soldadura das chapas com um ponto de soldadura	59
Figura 48 – Marcações realizadas nos provetes pré-soldadura com recurso ao espaçador fabricado	60
Figura 49 – Equipamento de soldadura CEA NKLT 28 em utilização para a soldadura dos provetes em aço	60
Figura 50 – Limagem dos elétrodos no equipamento de soldadura CEA NKLT 28	62
Figura 51 – Passagem da escova de aço nos elétrodos do equipamento de soldadura CEA NKLT 28	63
Figura 52 – Forno em utilização para a realização do pré-aquecimento dos provetes de alumínio 1050	64
Figura 53 – Colocação de espaçadores para a realização dos ensaios de corte em provetes fabricados por soldadura por pontos	65
Figura 54 – Realização de um ensaio de corte a provetes fabricados por soldadura por pontos ...	65
Figura 55 – Gráfico Força/Deslocamento típico proveniente de um ensaio de corte	66
Figura 56 – Amostras embebidas em resina para posterior medição da microdureza	67
Figura 57 – Equipamento de medição das microdureza – Struers Duramin	67
Figura 58 – Comparação para os provetes de 1,0 mm de aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	72
Figura 59 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 1A fabricado em aço St12	73
Figura 60 – Comparação para os provetes de 1,5 mm de Aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	74
Figura 61 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 5A fabricado em aço St12	75
Figura 62 – Comparação para os provetes de 2,0 mm de Aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	76
Figura 63 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 7C fabricado em aço St12	77
Figura 64 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, B e C fabricados em aço St12 com base na combinação de parâmetros número 7 do Método de Taguchi	77

Figura 65 – Gráfico Força/Deslocamento comparador das diferentes combinações de parâmetros definidas para a soldadura dos provetes de aço St12 com base no Método de Taguchi.....	78
Figura 66 – Representação gráfica da resposta do “ <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12.....	80
Figura 67 – Representação gráfica da resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12.....	81
Figura 68 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, B e C fabricados em aço St12 com base na combinação de parâmetros número 10 do Método de Taguchi	83
Figura 69 – Comparação das durezas medidas pelo método de Vickers nos provetes realizados com base nas combinações de parâmetros 10 e 11.....	84
Figura 70 – Fotografias macroscópicas com ampliação 12x para a combinação de parâmetros 11 (a) e 10 (b)	84
Figura 71 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 70°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	88
Figura 72 – Foto de rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 1A fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)	88
Figura 73 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 90°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	90
Figura 74 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 5C fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)	90
Figura 75 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 110°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros	91
Figura 76 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 9A fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)	92
Figura 77 – Representação gráfica da resposta do “ <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050	94
Figura 78 – Representação gráfica da resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050	95
Figura 79 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, D e E fabricados em alumínio 1050 com base na combinação de parâmetros número 3 do Método de Taguchi.....	96
Figura 80 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 3E fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)	97
Figura 81 – Comparação das durezas medidas pelo método de Vickers nas duas chapas em utilização para a soldadura do provete fabricado em alumínio com a combinação de Taguchi número 3.....	98
Figura 82 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes realizados para a combinação de parâmetros 6 com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento.....	99
Figura 83 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes realizados com a combinação de parâmetros 3 e um e dois pontos de soldadura	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens do processo de soldadura por pontos. Adaptado de [6], [11], [12]	23
Tabela 2 – Parâmetros ótimos definidos através de estudos realizados por diversos autores. Adaptado de [13], [69]–[71].....	42
Tabela 3 – Arranjo ortogonal para a realização do Método de Taguchi; P = 3 e L = 2. Adaptado de [79]	49
Tabela 4 – Percentagens de influência dos parâmetros de soldadura: intensidade de corte, força dos elétrodos e tempo de soldadura, com base no método de Taguchi para os ensaios de corte e “ <i>Direct Tensile Strenght</i> ”. Adaptado de [1].....	50
Tabela 5 – Composição química do aço St12	57
Tabela 6 – Composição química do alumínio 1050.....	57
Tabela 7 – Principais propriedades mecânicas do aço St12 e alumínio 1050.....	57
Tabela 8 – Parâmetros ótimos definidos pelo fabricante para a soldadura em aço	61
Tabela 9 – Combinação de parâmetros em utilização para a realização do método de Taguchi nos provetes em aço St12.....	62
Tabela 10 – Combinação de parâmetros em utilização para a realização do método de Taguchi nos provetes em aço St12.....	64
Tabela 11 – Medições dos diâmetros dos pontos de soldadura após a realização dos ensaios de corte aos provetes de aço St12.....	70
Tabela 12 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 1 mm de espessura	71
Tabela 13 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 1,5 mm de espessura	73
Tabela 14 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 2,0 mm de espessura	75
Tabela 15 – Valores de tensão de rotura (MPa) referentes ao Método de Taguchi para os provetes em aço St12.....	79
Tabela 16 – Níveis em utilização para os diferentes parâmetros de soldadura dos provetes de aço St12 com base no software Minitab	79
Tabela 17 – Tabela de resposta do “ <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12	80
Tabela 18 – Tabela de resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12.....	81
Tabela 19 – Resultados de valor de p referentes à aplicação do Método de Taguchi para os provetes de aço St12.....	82
Tabela 20 – Parâmetros em utilização para a soldadura dos provetes finais em aço St12	82
Tabela 21 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os provetes de aço St12 da combinação de parâmetros 10.....	83
Tabela 22 – Medições dos diâmetros dos pontos de soldadura após a realização dos ensaios de corte aos provetes de alumínio 1050	86
Tabela 23 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 70°C.....	87

Tabela 24 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 90°C.....	89
Tabela 25 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 110°C.....	91
Tabela 26 – Valores de força máxima (N) referentes ao Método de Taguchi para os provetes em alumínio 1050	92
Tabela 27 – Níveis em utilização para os diferentes parâmetros de soldadura dos provetes de alumínio 1050 com base no software Minitab	93
Tabela 28 – Tabela de resposta do “ <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050.....	93
Tabela 29 – Tabela de resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050	94
Tabela 30 – Resultados de valor de <i>p</i> referentes à aplicação do Método de Taguchi para os provetes de alumínio 1050	95
Tabela 31 – Parâmetros em utilização para a obtenção dos resultados mais elevados de força máxima nos provetes de alumínio 1050 com base no Método de Taguchi	96
Tabela 32 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 da combinação de parâmetros 3	97
Tabela 33 – Resultados de força máxima obtidos nos ensaios de corte realizados para a combinação de parâmetros 3 do alumínio 1050 utilizando pré-aquecimento e sem pré-aquecimento	98
Tabela 34 – Resultados médios de força e secção obtidos nos provetes realizados com a combinação de parâmetros 3 e dois pontos de soldadura	100

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
BM	Material de base
CHAZ	Ferrite pró-eutectóide e martensite
EF	Força do eletrodo
FHAZ	Ferrite e perlite
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
MB	Material de base
OA	<i>Orthogonal Array</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PWIT	<i>Post Weld Impact Treatment</i>
ZF	Zona de fusão
ZTA / HAZ	Zona termicamente afetada

Lista de Símbolos

e	Espessura de chapa	Milímetros
Hz	Frequência	Hertz
I / WC	Intensidade de corrente	Ampere
Q	Calor gerado	Joule
R	Resistência	Ohm
t / WT	Tempo de passagem de corrente	Segundos

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

A soldadura por pontos é um processo de soldadura por resistência em que a ligação de duas peças na forma de chapa ocorre através da corrente elétrica que as atravessa. Para o efeito utilizam-se dois elétrodos à base de uma liga de cobre especial que permitem exercer pressão sobre os materiais a ligar, sendo esta pressão que assegura o contacto e permite que a corrente elétrica o atravessasse, proporcionando a formação de um núcleo fundido entre as chapas.

São várias as situações industriais em que o processo é utilizado, seja para proceder a uma soldadura definitiva, seja como método de posicionamento, seja como reforço de uma ligação adesiva, por exemplo.

A execução da soldadura por pontos passa pela afinação otimizada dos diferentes parâmetros envolvidos, incluindo os parâmetros da máquina e os parâmetros geométricos onde se incluem os materiais e as espessuras das chapas a ligar.

Neste trabalho apresenta-se um estudo focado na utilização da metodologia de Taguchi para otimização das condições de soldadura, contextualizando-o do ponto de vista académico e experimental através de uma revisão bibliográfica acerca das melhores práticas referidas na literatura e no planeamento adequado de um programa experimental que comporte a correta conjugação de fatores de modo a estabelecer correlações e efeitos principais dos diferentes parâmetros. No estudo serão utilizados dois tipos de materiais diferentes: aço ao carbono St12 e alumínio comercial 1050.

1.1. Contextualização

O presente relatório foi realizado no contexto da dissertação de Mestrado de Engenharia Mecânica da área de Materiais e Tecnologias de Fabrico do Instituto Superior de Engenharia do Porto a realizar ao longo do 2º ano do mesmo.

1.2. Objetivos

Com referido anteriormente, o principal objetivo é a determinação dos melhores parâmetros para a realização de soldaduras por pontos em chapas de aço St12 e alumínio 1050, considerando a utilização de diferentes espessuras.

Desta forma, inicialmente, realizou-se uma pesquisa sobre o funcionamento deste método de soldadura e do equipamento a ser posteriormente utilizado de forma a serem determinados os parâmetros mais importantes a estudar.

Este enquadramento permitirá um planeamento experimental baseado na soldadura dos diferentes provetes com as combinações de parâmetros determinados pelo Método de Taguchi de forma a executar os diferentes ensaios requeridos para este método de soldadura e assim determinar os parâmetros ótimos para os dois materiais em estudo.

No decorrer do estudo, os pontos de soldadura serão sujeitos a uma caracterização visual e mecânica no sentido de os correlacionar com comportamento da junta e com os parâmetros utilizados na sua execução.

1.3. Metodologia

Através do estudo previamente descrito determinaram-se os parâmetros fundamentais a estudar neste método de soldadura, encontrando-se estes divididos de forma separa nos dois materiais. O parâmetros de intensidade de corrente e tempo de soldadura encontra-se em estudo em ambos os materiais, variando a espessura de chapa e tempo de pré-aquecimento no aço St12 e alumínio 1050, respetivamente.

Posteriormente, e através do Método de Taguchi, foram realizadas as combinações de parâmetros a realizar, tendo-se obtido nove combinações. Para cada variação realizaram três provetes que foram posteriormente submetidos a ensaio de corte e filiação de durezas para caracterizar a melhor combinação de parâmetros a usar com cada material.

1.4. Estrutura do relatório

No segundo capítulo inicia-se o enquadramento do trabalho com uma revisão bibliográfica do processo de ligação em estudo bem como um levantamento dos principais estudos e resultados publicados na literatura.

Posteriormente encontra-se o capítulo de métodos e aplicação, onde se descreve ensaios complementares ao estudo e a forma de realização da soldadura, dos ensaios e da preparação das amostras.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados e a sua discussão de forma a posteriormente no capítulo seguinte se apresentar as conclusões dos mesmos.

A finalizar o documento, as referências bibliográficas e outras fontes que se encontram organizadas segundo a forma de referência IEEE e ainda a apresentação dos anexos relevantes.

1.5. Local/Empresa de acolhimento

O desenvolvimento do presente relatório será realizado no Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, e contando com quatro equipamentos diferentes: equipamento de corte do material, ADIRA GM 0410, máquina de soldadura por pontos CEA NKLT 28, a máquina universal de ensaios SHIMADZU Autograph AG-X de 100 KN, e o microdurómetro Struers Duramin.

O desenvolvimento do Método de Taguchi será auxiliado pelo software MiniTab.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de soldadura são muito utilizados quando se pretende ligar dois materiais similares ou dissimilares. Neste capítulo irá ser realizada uma revisão do processo de soldadura por pontos, apresentar o funcionamento do mesmo, as suas aplicações, vantagens e desvantagens, assim como, variantes possíveis de se observar em contexto empresarial. O capítulo finaliza com a introdução do Método de Taguchi a utilizar no tratamento dos dados experimentais que serão realizados posteriormente à entrega deste relatório.

2.1. Soldadura por pontos

Como previamente referido, os processos de soldadura conseguem ligar dois materiais, tanto similares como dissimilares, sem a necessidade de utilização de um corpo externo que promova esta junção, como é o caso das ligações aparafusadas ou rebitadas.

A soldadura por pontos, ou "*Spot Welding*", engloba-se nos processos de soldadura por resistência e obteve os seus primeiros desenvolvimentos no final do século XIX, [1]. Atualmente, é um dos processos de soldadura com maior relevo na soldadura de chapas, uma vez que esta ligação é realizada de forma mais eficiente por não ser necessária a utilização de um cordão de soldadura ao longo de toda a extensão da zona a soldar.

2.1.1. Funcionamento

O processo de soldadura por pontos, em oposição à maioria dos processos convencionais de soldadura, não necessita de material de adição, ou seja, as chapas a soldar são fundidas localmente pelo calor gerado na passagem da corrente elétrica obtendo-se assim a ligação. Para o efeito as chapas são colocadas em sobreposição na zona onde se pretende realizar os pontos de soldadura.

Desta forma, para a sua ligação, é aplicada pressão através de elétrodos em congruência com um aumento de temperatura proveniente de uma corrente elétrica na zona pretendida, [2]. Na figura 1 apresenta-se um esquema demonstrativo do processo de soldadura por pontos.

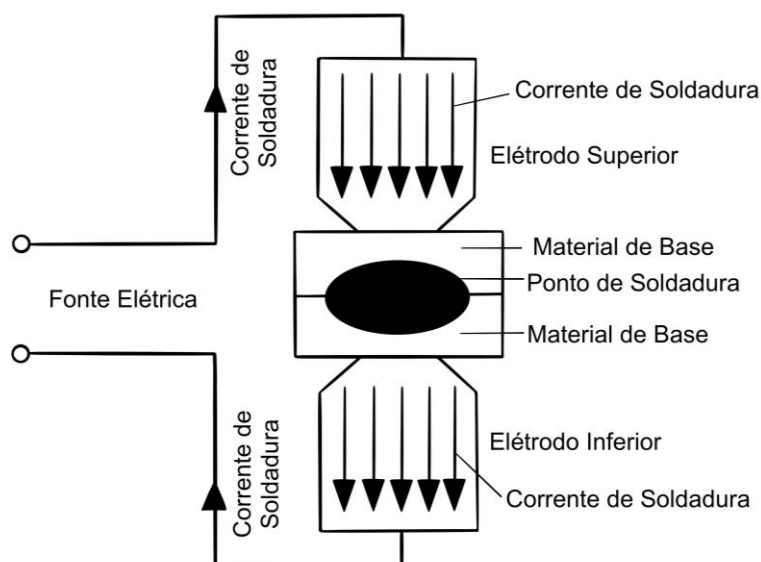


Figura 1 – Diagrama representativo do processo de RSW (*Resistance Spot Welding*). Adaptado de [3]

Os eletrodos transmissores de corrente produzem-se em ligas de cobre, uma vez que estas apresentam superior ponto de fusão, alta condutividade térmica e baixa resistência elétrica aquando da sua comparação com os metais que se pretendem soldar. Apesar dos eletrodos de cobre serem os mais comuns, em certas aplicações torna-se necessário o uso de eletrodos produzidos em materiais como Tungsténio e Molibdénio, [4]–[6]. Desta forma, o aquecimento dá-se maioritariamente nas chapas a soldar, levando a sua fusão e criação de um denominado *“nugget”*, sendo este o local onde ocorre a fusão de ambas as chapas de base. De forma a aumentar o tempo de vida dos eletrodos e reduzir a transmissão do material destes para os componentes a soldar, os eletrodos são na maioria das aplicações arrefecidos através da circulação de água no seu interior, [7].

Além da escolha do material, para a correta aplicação dos eletrodos, é necessário um estudo sobre as diferentes geometrias e as suas aplicações. Assim, ao longo da evolução do processo, foram sendo desenvolvidas geometrias variadas, sendo atualmente usadas sete variações de ponteiros principais: *“pointed nose”*, *“dome nose”*, *“flat nose”*, *“offset nose”*, *“truncated nose”*, *“radius faces”* e *“angled nose”* [8]. O *“pointed nose”* é o eletrodo aplicável a maior número de soldaduras.

Na figura 2 observa-se as diferentes geometrias de ponteiros de eletrodos atualmente em utilização.



Figura 2 – Diferentes geometrias das ponteiros dos elérodos. Adaptado de [8]

Os elérodos retos, são os mais utilizados, devido à sua simplicidade e ao facto de apresentarem uma menor disposição para a ocorrência de deformações dada a sua tendência para se manterem a temperaturas mais reduzidas. A aplicação de arrefecimento interno a água é, também, mais simples permitindo o aumento da sua durabilidade.

Posteriormente, e devido à necessidade da indústria de aplicações mais complexas, foram sendo desenvolvidos diferentes elérodos, desde elérodos curvos, a elérodos com pontas quadradas, figura 3.



Figura 3 – Geometrias complexas de elérodos. Adaptado de [8]

A comparação de 3 diferentes ponteiros, neste caso “*pointed nose*”, “*truncated nose*” e “*radius faced*”, foi realizada por [9]. Desse estudo foi possível observar um aumento do aparecimento de fraturas no elétrodo com “*truncated nose*” e uma redução muito acentuada no elétrodo com “*radius face*”. Na figura 3 são apresentados os resultados da aproximação de uma secção pertencente ao corte na zona central do ponto de soldadura para os 3 elérodos em comparação no estudo.

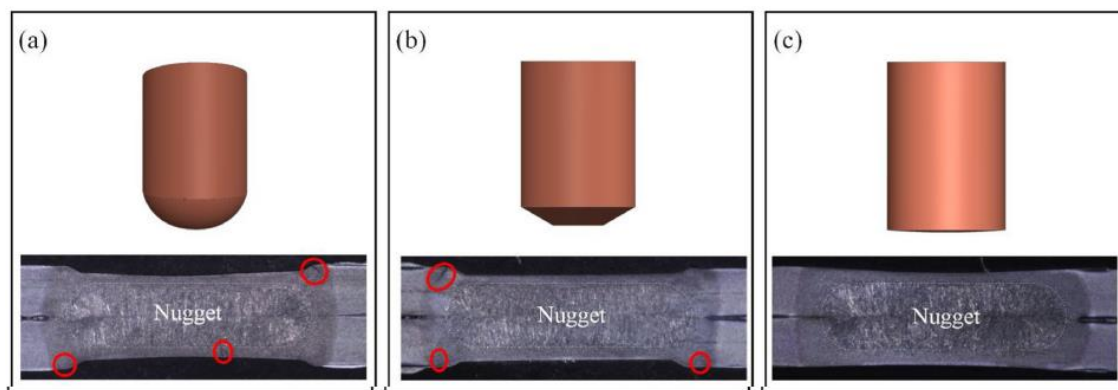


Figura 4 – Comparação da estrutura de corte da zona central do ponto de soldadura para 3 elétrodos: “pointed nose” (a), “truncated nose” (b) e “radius face” (c). Circunferências vermelhas representam as zonas de fratura. Adaptado de [9]

Através da figura 4, é possível observar a variação da geometria do ponto de soldadura, assim como a profundidade da indentação causada pelos 3 diferentes elétrodos com base nos mesmos parâmetros de soldadura. No estudo das fraturas, os autores concluíram que o aumento do aparecimento das mesmas no elétrodo com o “truncated nose” tem por base a variação acentuada nas zonas circundantes do ponto, sendo este ângulo reduzido no “pointed nose” e, assim, também apresenta menos probabilidade de fraturas por comparação. Este problema não se apresenta no “radius face”, uma vez que apenas se aplica a face dos elétrodos e não as laterais aquando da realização da soldadura, [9].

Para a correta soldadura, realizada por este processo, torna-se necessário que este ocorra de forma quase instantânea, sendo assim utilizadas voltagens muito baixas, mas correntes elétricas muito elevadas, normalmente na casa dos milhares de amperes, [6], [10]. O calor gerado pelo processo têm por base a equação 1, [6], [7], [10]–[12]

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

Sendo,

Q – Calor gerado, Joule

I – Intensidade de corrente, Ampere

R – Resistência, Ohm

t – Tempo de passagem da corrente elétrica, segundos

Com base na geometria de posicionamento dos componentes e da passagem da corrente elétrica, é possível considerar a existência de 5 resistências em série, sendo necessário ter em conta a sua soma aquando da aplicação da equação do calor gerado. As resistências em consideração dividem-se em duas categorias principais: resistências internas e resistências de contacto. Na primeira categoria é possível distinguir a resistência interna do componente superior a soldar e outra

resistência para o componente inferior. Na segunda categoria existem 3 resistências a considerar: a resistência de contacto entre o componente superior e o eléctrodo, a resistência de contacto entre ambos os componentes e a resistência de contacto do componente inferior com o eléctrodo, [13].

Assim, o funcionamento correto deste processo tem por base 3 etapas principais: [6]

- **Primeira Etapa**

Nesta etapa ocorre a aplicação dos eléctrodos de cobre, ou seja, após a fixação do componente os eléctrodos são pressionados contra os materiais a soldar aplicando-se a pressão previamente definidos pelo operador.

- **Segunda Etapa**

Posteriormente aplica-se a corrente eléctrica através dos eléctrodos, o que permite a fusão das chapas a soldar e o aparecimento de uma zona de metal fundido entre as duas peças a soldar.

- **Terceira Etapa**

A última etapa do processo envolve uma continua aplicação de força através dos eléctrodos, sem a aplicação de corrente eléctrica, permitindo assim o arrefecimento e solidificação do material soldado sem a ocorrência de deslizamentos ou deformações neste.

A figura 5 apresenta as diferentes etapas deste processo, onde a linha azul apresenta o movimento dos eléctrodos e a linha laranja a intensidade de corrente, sendo ambos ao longo do tempo do processo.

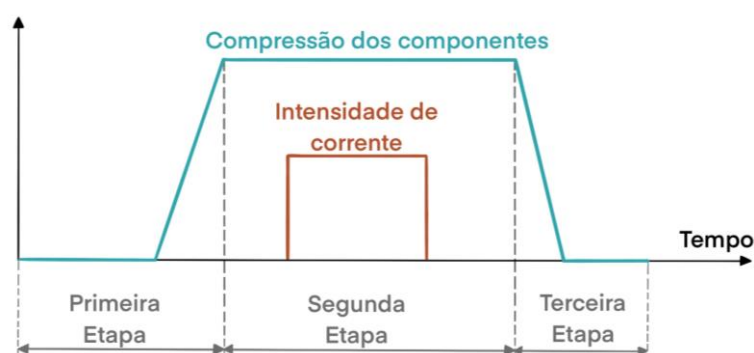


Figura 5 – Diagrama esquemático das diferentes etapas presentes no processo de soldadura por pontos.

Adaptado de [7]

2.1.2. Aplicações

Este processo torna-se extremamente usado na indústria automóvel [14], dado que permite reduções dos custos, maiores velocidades e rapidez de aplicação destes sistemas em diferentes componentes, [15], [16]. Assim, no processo de montagem de um automóvel moderno, existem entre 2000 e 5000 pontos de soldadura, [1]. Na indústria aeroespacial tem sido realizada soldadura por pontos em congruência com ligações adesivas de forma a permitir um maior isolamento da ligação, [17].

No que se refere aos materiais, este processo ganha relevância nos materiais como as ligas metálicas ferrosas [18], nomeadamente aços inoxidáveis [19], sendo atualmente necessário um foco mais elevado no estudo de ligas de alumínio devido à sua elevada utilização em estruturas automóveis e na indústria aeroespacial, [20]. Outros materiais menos comuns de soldar englobam aços galvanizados, magnésio, ligas de zinco, ligas de níquel, Monel, Inconel, titânio, bronze silício e cobre, sendo necessário elétrodos específicos para ocorrer a correta soldadura de alguns destes materiais, [6], [11].

2.1.3. Vantagens e Desvantagens

A aplicação deste processo apresenta diversas vantagens e desvantagens aquando da sua comparação com outros processos de soldadura e outros processos de ligação de materiais, [6], [11], [12]. Na tabela 1 encontram-se listadas algumas destas vantagens e desvantagens.

Velocida

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens do processo de soldadura por pontos. Adaptado de [6], [11], [12]

Vantagens	Desvantagens
Capacidade de aumentar a dureza dos componentes a soldar	Possibilidade de deformação dos componentes a soldar
Velocidade de soldadura elevada	Ocorrência de salpicos de soldadura devido a parâmetros de soldadura incorretos.
Processo facilmente automatizável	Alinhamento das chapas é crítico para uma soldadura correta
Possibilidade de soldadura de várias chapas em simultâneo	Impossibilidade de soldar espessuras de chapa muito elevadas
Não necessita de materiais de adição consumíveis	Os elétrodos podem desenvolver fissuras devido aos ciclos térmicos que se encontram sujeitos
Permite a criação de soldaduras controladas e sem grande variação	Não é possível soldar componentes aos quais não existe acesso de ambos os lados
Possibilidade de soldar qualquer material condutor	Possibilidade de endurecimento do “nugget” de forma elevada levando ao aparecimento de fissuras neste local
	Ocorrência de salpicos de soldadura devido a parâmetros de soldadura incorretos.
	Processo visualmente menos apelativo

2.1.4. Variantes do processo

Sendo a soldadura por pontos, um processo com bastante ênfase no mercado atual, têm vindo a ser desenvolvidas variações deste processo de forma a otimizar e proporcionar melhorias ao nível das propriedades mecânicas conseguidas na ligação. Desta forma, os processos de soldadura por roletes e a soldadura por projeção surgiram, permitindo um aumento da eficiência do processo, e as juntas híbridas com uso de adesivos permitiu o aumento das propriedades mecânicas das juntas soldadas, nomeadamente uma uniformização da distribuição de tensões.

- **Soldadura por roletes**

Sendo este um processo baseado na soldadura de apenas um ponto, torna-se um processo mais demorado quando se pretende realizar diversos pontos de solda ao longo de uma chapa. Desta forma, foi desenvolvida uma variante deste processo com base em rolos, onde a soldadura não se realiza com base em êmbolos, mas sim rolos de bronze que se deslocam ao longo da linha a soldar e se aplica a corrente elétrica para a realização da soldadura em intervalos de tempo previamente

definidos, figura 6, [21]. Este processo permite, através de variações na velocidade dos rolos ou de alterações na frequência dos impulsos elétricos obter-se distâncias dispares entre pontos, desde soldas muito afastadas a soldas quase contínuas, [7], [22].

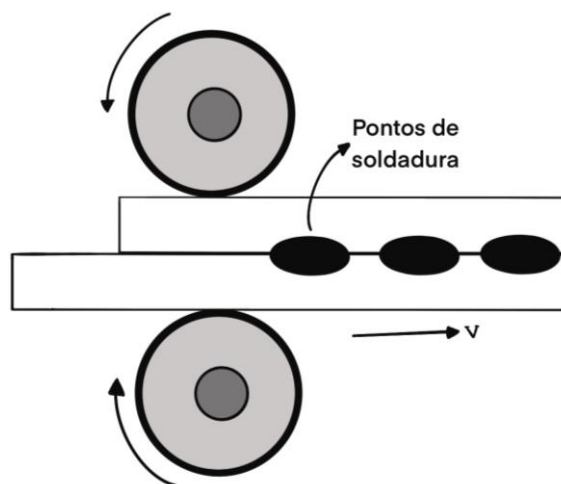


Figura 6 – Soldadura de pontos por roletes. Adaptado de [23]

- **Soldadura por projeção**

O processo de soldadura por projeção, tal como o processo convencional de soldadura por pontos, implica o aparecimento do “*nugget*” na zona interna dos dois componentes que se pretende soldar. Contrariamente, este processo necessita de uma deformação plástica prévia de um dos componentes a soldar, tal como demonstrado na figura 7. Assim, permite uma escolha prévia dos locais de soldadura, levando a uma melhoria estética do processo e a um aumento da eficiência da soldadura, uma vez que, reduz a energia gasta e aumenta a resistência da própria solda, [7], [24].

Neste processo torna-se necessário a utilização de elétrodos de face plana de forma a permitir a distribuição equivalente da força aplicada, sendo esta variação principalmente crucial quando se pretende realizar a solda de mais do que uma projeção em simultâneo, [25], [26].

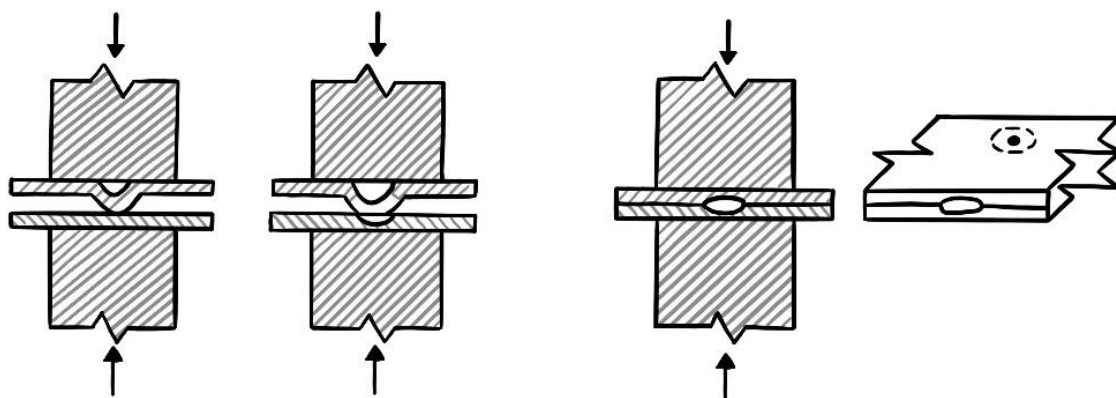


Figura 7 – Processo de Soldadura de pontos por projeção. Adaptado de [27]

Devido à utilização da deformação plástica prévia, este processo permite a soldadura de espessuras de chapa superiores ao processo convencional de soldadura por pontos. Nos casos onde se pretende soldar chapas de diferentes espessuras as projeções devem ser realizadas na chapa mais espessa, [25]. Sendo este um processo versátil, permite também a soldadura não só de chapas, mas também de porcas, insertos roscados, entre outros, [24].

- **Juntas híbridas de soldadura por pontos com adesivos**

Uma das grandes variantes do processo de soldadura por pontos, e com elevado relevo nos tempos atuais, tem por base a aplicação de adesivos nas juntas previamente à realização dos pontos de soldadura. As juntas em questão tornaram-se possíveis devido aos recentes avanços nos materiais adesivos, e são parte essencial do mercado aeroespacial e automóvel devido às suas excelentes propriedades acústicas e de anti corrosão em conjunção com elevada resistência mecânica das juntas, [17], [28].

Nos ensaios realizados e publicados por [17] foi notória uma decomposição do adesivo na zona onde se realiza a soldadura por pontos, devido às elevadas temperaturas presentes. A variação do diâmetro de ponto de soldadura em função da densidade do adesivo foi também estudada, tendo os autores demonstrado um menor valor de diâmetro densidade de adesivos superiores.

Por fim, com base em placas de aço revestidas em titânio e no adesivo de epóxido *Syntho-Subsea* LV, os autores obtiveram resultados de tensão de corte superiores em juntas híbridas, quando comparadas com juntas soldadas.

Outros estudos realizados por [29], com base em placas de alumínio 2024 e adesivo de epóxido de dois componentes CHS-EPODUR 619, demonstram resultados positivos quando se comparam juntas híbridas com juntas soldadas por pontos, obtendo-se resultados duas vezes superiores na tensão de rotura e uma capacidade de absorção de energia seis vezes superior nas juntas inicialmente referidas. Este estudo permitiu, também, identificar o modo de falha da ligação, iniciando-se esta com a separação do adesivo do aderente e posterior corte do “*nugget*” proveniente da soldadura.

2.1.5. Modos de rotura

Devido à natureza da soldadura por pontos, esta dá origem a duas categorias de roturas, rotura da interface, ocorrendo na zona central do “*nugget*”, e rotura por “*pullout*”, onde ocorre arranque do ponto de soldadura de uma das chapas soldadas. Na figura 8 é possível observar os diferentes modos de rotura.

Estudos realizados por diversos autores demonstraram que roturas ocorrentes na interface absorvem menos energia até à rotura aquando da sua comparação com o método “*pullout*”. [30] Este fenómeno deve-se à qualidade da soldadura, uma vez que, quando esta é realizada com os parâmetros corretos, o material soldado apresenta propriedades mecânicas iguais ou superiores às do material de base, sendo necessária mais energia para se obter rotura.

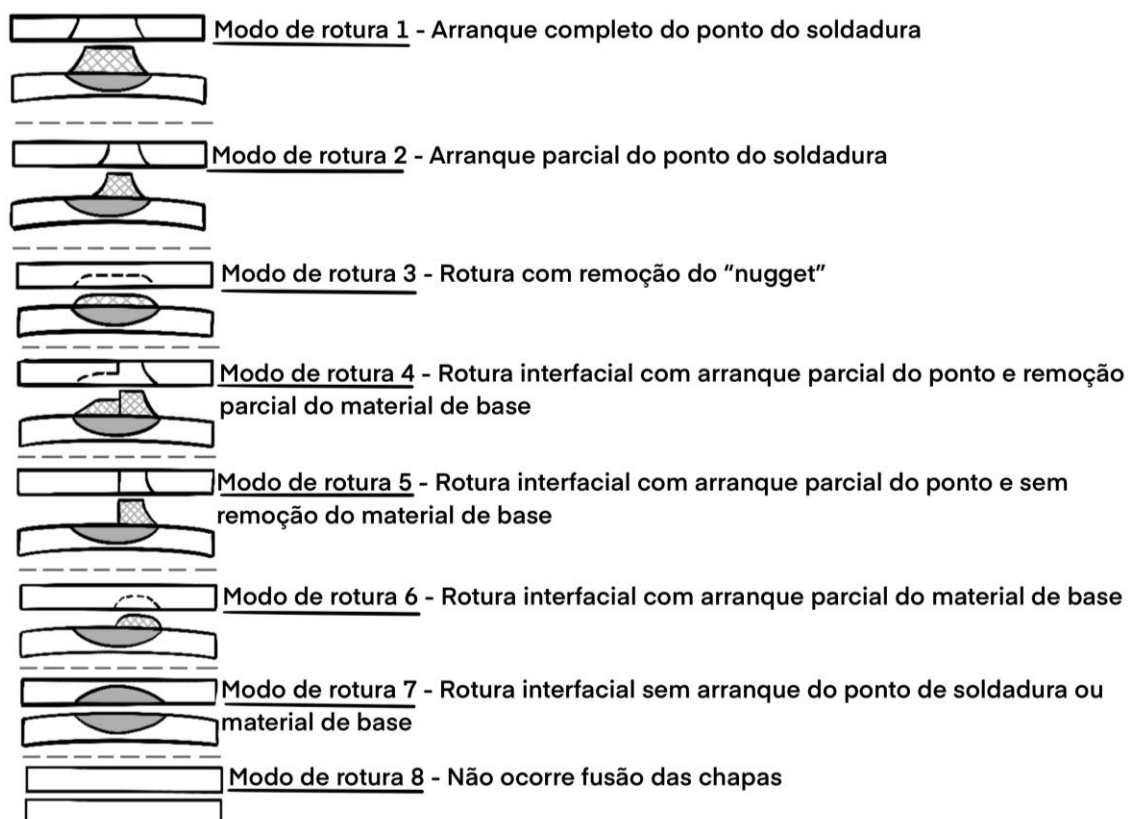


Figura 8 – Modos de rotura ocorrentes nas soldaduras por pontos. Adaptado de [31]

Tal como apresentado na figura 9, a rotura por “pullout” apresenta uma maior capacidade de absorção de energia, resultante de uma maior tensão de rotura, sendo essencial proceder a escolha de parâmetros de soldadura que levem aparecimento deste modo de rotura em prol do modo de rotura da interface. [30]

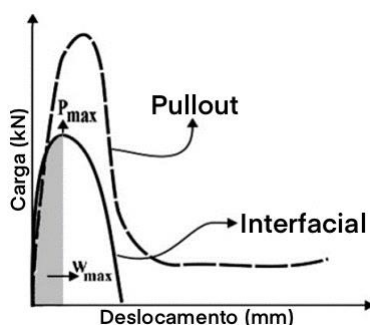


Figura 9 – Gráfico de força por deslocamento para os dois modos principais de rotura ocorrente na soldadura por pontos. Adaptado de [30]

2.1.6. Qualidade da soldadura – aspeto do “nugget” e defeitos existentes

A correta realização de uma soldadura por pontos tem em conta a existência prévia de defeitos de forma a permitir uma melhoria contínua dos parâmetros em utilização. Assim, o estudo dos defeitos

existentes e das suas causas permite uma melhor caracterização da soldadura realizada. Os principais defeitos existentes neste processo podem ser divididos em 5 tipos: salpicos de soldadura, indentação nas superfícies, fendas ou poros, marcas assimétricas nos pontos e expulsão de material na zona interna, [32]–[34].

- **Salpicos**

O aparecimento de salpicos na zona externa das chapas soldadas tem como principal causa a utilização de uma corrente de soldadura demasiado elevada ou força de elétrodo muito reduzida, levando assim a queima de material e diminuição da resistência mecânica da soldadura. O aparecimento de salpicos pode, também, dever-se à existência de desalinhamento nos elétrodos em utilização, tanto a nível do alinhamento vertical como do paralelismo entre ambas as pontas do elétrodo que contactam com o material a soldar, [33], [35], [36].

- **Indentações das superfícies**

As indentações das superfícies caracterizam-se pelo aparecimento de concavidades muito acentuadas no local onde se realizou o ponto de soldadura, figura 10. Este defeito pode ser corrigido através da redução da força aplicada no elétrodo, [33], [37].



Figura 10 – Caracterização de uma indentação da superfície do ponto de soldadura. Adaptado de [37]

- **Fendas ou Poros**

O aparecimento de fendas aparece, na sua maioria, devido a uma baixa resistência da soldadura, ou seja, quando dois componentes não se encontram corretamente soldados, figura 11. O aparecimento destes defeitos deve-se, em geral, a uma baixa corrente de soldadura ou intensidade de corrente, a um deficiente arrefecimento ou a um tempo de aperto insuficiente, [33], [38].



Figura 11 – Visualização do aparecimento de poros e fendas na zona interna do ponto de soldadura.

Adaptado de [39]

- **Marcas assimétricas nos pontos**

As marcas assimétricas referem-se a variações visuais presentes nas zonas externas da soldadura, tanto na zona superior como inferior, sendo esperado o aparecimento de uma marca com geometria igual ou muito aproximada da geometria do eletrodo, sendo esta na maioria das situações circular.

Irregularidades nas marcas resultantes da soldadura pode identificar desalinhamentos dos eletrodos ou a presença de componentes externos no local da mesma, [33], [40].

- **Expulsão**

A expulsão de material fundido, figura 12, neste processo ocorre na zona interna entre as duas chapas que se pretendem soldar, devendo-se na sua maioria a pressão de soldadura insuficiente, eletrodos danificados, desalinhamentos na zona de contacto, superfícies contaminadas e excesso de intensidade de corrente. Estes defeitos caracterizam-se por uma redução acentuada dos valores de tensão de rotura e da resistência à fratura da própria soldadura, [33], [41], [42].

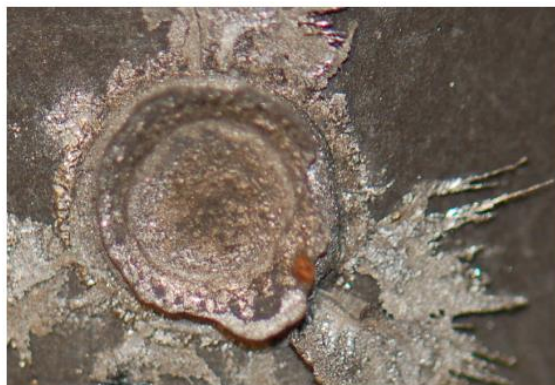


Figura 12 – Visualização do defeito de expulsão após submissão a um Ensaio de “Peel”. Adaptado de [43]

2.1.7. Métodos não destrutivos de caracterização da soldadura

Devido à necessidade em realizar análises de juntas soldadas sem proceder à sua destruição, foram desenvolvidos métodos não destrutivos que permitem caracterizar a correta realização da junta, assim como, a longo prazo, perceber se ocorreu o aparecimento de defeitos provenientes da normal utilização do equipamento. Deste modo, para a realização de um estudo aprofundado de uma junta soldada por pontos, são aplicados três métodos principais de análise: ultrassons, termografia por infravermelhos e termografia por correntes de *Eddy*, [31].

- **Ultrassons**

O método de análise por ultrassons apresenta-se como o mais utilizado em termos industriais, uma vez que, apesar de apresentar um tempo de realização prolongado, dá uma boa indicação do tamanho do “*nugget*”, [31].

Apesar da sua elevada utilização, os ultrassons, apresentam algumas desvantagens, tais como, a necessidade de funcionários com treino específico na leitura dos resultados, na medida em que estes são realizados em altas frequências refletidas no local a analisar, sendo traduzidos posteriormente, através de softwares específicos, para gráficos que necessitam de comparação com valores de referência para uma leitura correta dos mesmos. Em contrapartida, uma vez que os resultados são estudados por comparação, é possível obter resultados quanto ao diâmetro do “nugget”, penetração da soldadura, descontinuidades internas e expulsão interna ocorrente, [31], [44], [45].

- **Termografia por Infravermelhos**

A termografia por infravermelhos permite a programação desta inspeção de forma automática, sendo bastante utilizada em situações de produção em série de forma a aumentar a produtividade do processo. Estas termografias permitem também a sua adequação a uma gama elevada de equipamentos, fontes de infravermelhos e algoritmos de análise de imagens, [43].

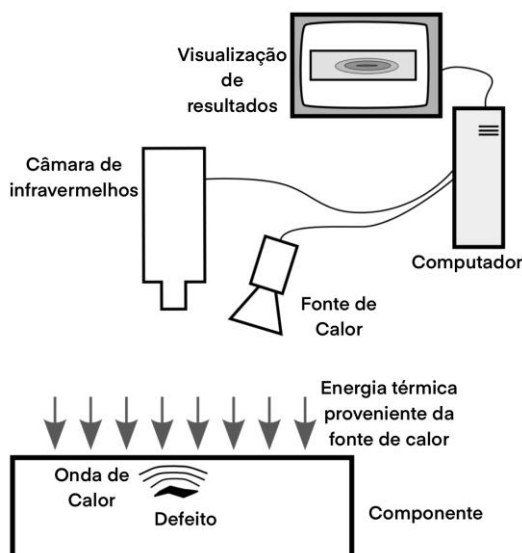


Figura 13 – Funcionamento de uma termografia por infravermelhos. Adaptado de [43]

Tal como apresentado na figura 13, a realização de uma termografia por infravermelhos tem por base o aquecimento do componente através de uma fonte de geração de calor, através do qual, uma máquina de registo térmico realiza a leitura dos valores de temperatura e envia os resultados obtidos para um software, sendo posteriormente tratados. Os resultados obtidos desta leitura encontram-se na figura 14, [43].

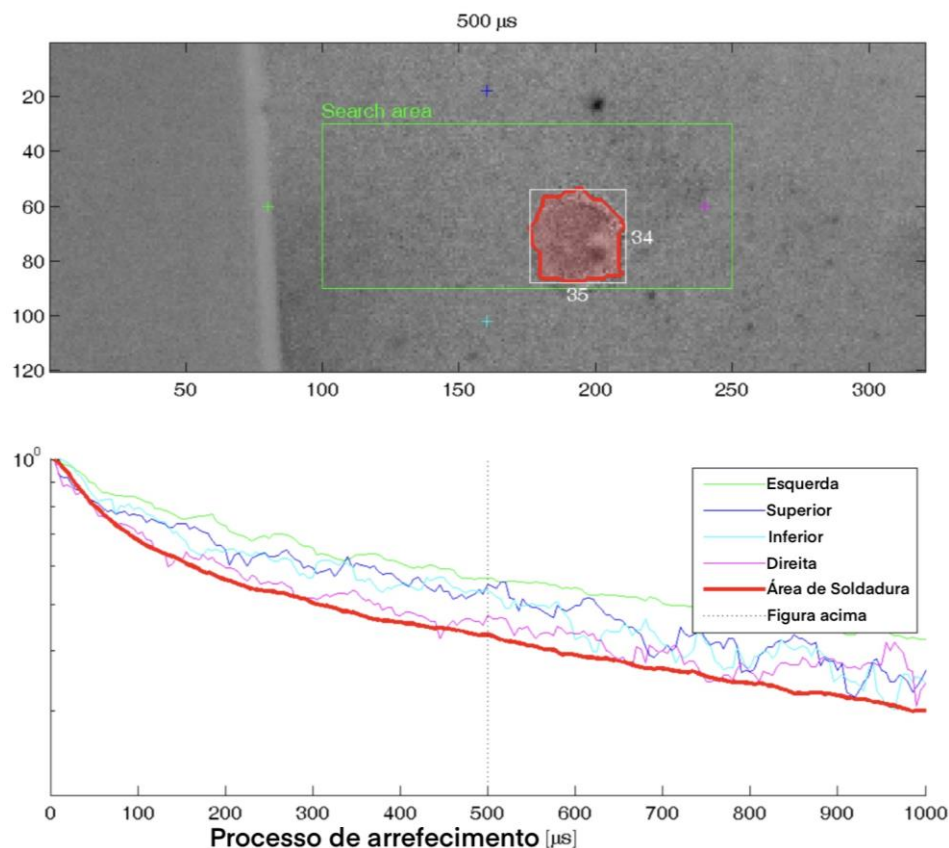


Figura 14 – Resultados obtidos da realização de uma termografia por infravermelhos. Adaptado de [43]

○ Termografia por Infravermelhos *Lock-in*

A termografia por infravermelhos *Lock-in* representa uma variação do processo de termografia por infravermelhos, na medida em que, existem alterações na frequência usada ao longo da aplicação do método de forma a ser possível obter melhores resultados nas imagens. Este processo tem por base a emissão de uma onda que, aquando da sua penetração no componente, ocorre reflexão parcial da mesma proveniente da existência de defeitos. Quando a onda refletida interfere com a onda posteriormente emitida ocorre uma variação de frequência, que é estudada e posteriormente aplicada na termografia, levando a um aumento da leitura dos defeitos existentes, [46], [47].

Este processo, permite uma melhoria do rácio S/N, sendo este posteriormente estudado aquando do subcapítulo referente ao método de Taguchi, [48].

● Termografia por Correntes de *Eddy*

Este método tem por base uma combinação de dois processos, as correntes de *Eddy* e as termografias, sendo então realizado com a aplicação de uma corrente eletromagnética, de um aquecimento existente no componente e na posterior inspeção por infravermelhos. As termografias por Correntes de *Eddy*, ou também designadas, termografias por indução ou inspeção por termo-indução, são aplicáveis a materiais eletricamente condutores, e conseguem detetar tanto defeitos internos como superficiais, sendo bastante vantajoso quando aplicado em componentes de geometria complexa, [49]–[52].

Um estudo realizado por [53], permitiu uma comparação entre os resultados obtidos nos métodos de ultrassons, termografias de infravermelhos e termografias de infravermelhos *lock-in*, sendo os resultados apresentados na figura 15. Através destes resultados os autores concluíram que o método de ultrassons apresenta bastante menor resolução que a termografia de infravermelhos, sendo a termografia de infravermelhos *lock-in* muito superior a ambas.

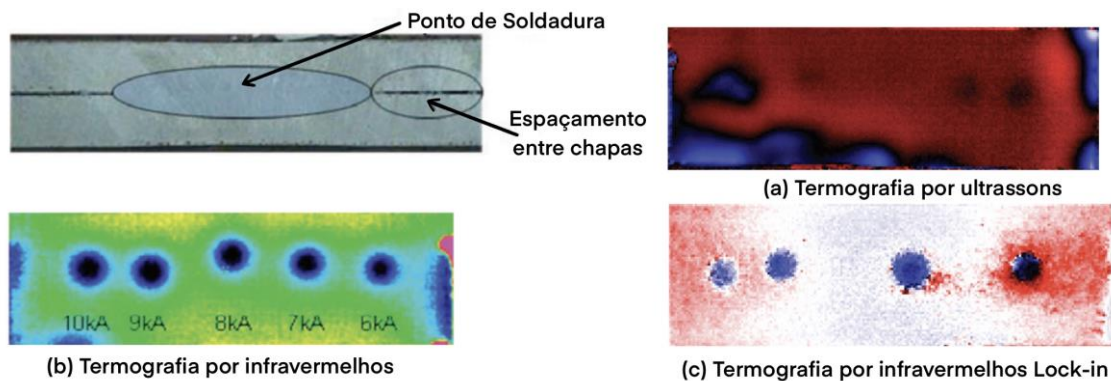


Figura 15 – Comparação dos resultados obtidos no método de ultrassons (a), termografia por infravermelhos (b) e termografia por infravermelhos *Lock-in* (c). Adaptado de [53]

2.1.8. Métodos destrutivos de caracterização da soldadura

Devido à natureza das juntas realizadas por soldadura por resistência, a avaliação da sua qualidade e integridade estrutural pode ser realizada, numa primeira fase, recorrendo a ensaios não destrutivos. Além disso, a aplicação da técnica e os parâmetros utilizados são passíveis de serem avaliados laboratorialmente através da realização de ensaios destrutivos.

Estas juntas de soldadura são predominantemente ensaiadas de forma destrutiva com base em 5 ensaios diferentes, sendo estes “*Chisel*”, “*Peel*”, “*Shear Tensile Strenght*” (ensaio de corte), “*Roller Peel*”, “*Direct tensile Strenght*” e “*Cross Tension*”, [31].

- Ensaios de “*Chisel*” e “*Peel*”

A realização destes ensaios, tem por base a norma ISO 10447:2006, onde se indicam os procedimentos para a sua realização, assim como as diferentes formas de realização de cada um, “*chisel*” e “*peel*”, respetivamente, apresentados nas figuras 16 e 17, [54].

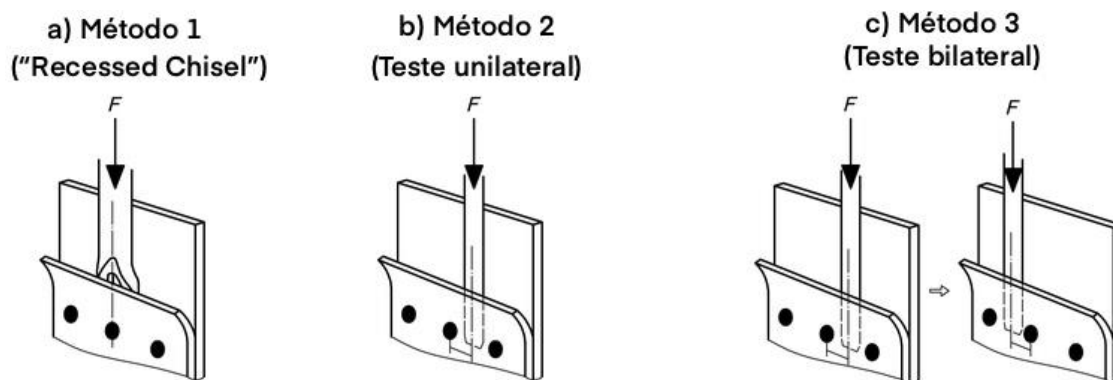


Figura 16 – Métodos de realização do ensaio de “Chisel” com base na norma ISO 10447:2006. Adaptado de [54]

O ensaio de “Chisel” caracteriza-se pela introdução de uma ferramenta denominada “Chisel” entre os pontos de soldadura, podendo este ser realizado de 3 forma diferentes, sendo nas três aumentada a força aplicada até à ocorrência da rotura dos pontos de soldadura, tal como apresentado na figura 16. Através deste ensaio é estudado o diâmetro médio do furo resultante do arranque do ponto de soldadura, a indentação provocada nas chapas, a circularidade interna do ponto de soldadura, o modo de falha e se existem indícios de expulsão do material, [31], [54], [55].

Na figura 17 é possível observar os resultados obtidos através de um ensaio de “Chisel”.



Figura 17 – Ensaio de “Chisel” realizado em laboratório com base em chapas de 1,4 mm de DP 3500/600. Adaptado de [55]

O ensaio de “Peel”, tal como ilustrado na figura 18, tem dois modos de realização, um manual e um automatizado, e consiste no arranque de uma das chapas da outra, apresentado uma condição de esforço no ponto que é diferente do ensaio de “Chisel”. Nestes ensaios a rotura ocorre maioritariamente na zona termicamente afetada, [31], [54], [56].

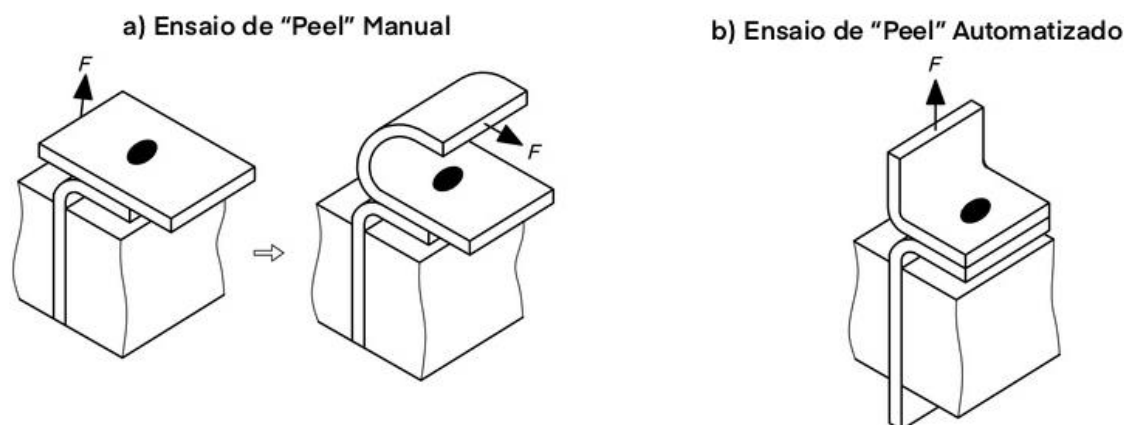


Figura 18 – Métodos de realização do ensaio de "Peel" com base na norma ISO 10447:2006. Adaptado de [54]

- Ensaio de "Roller Peel", "Shear Tensile Strength" e "Direct Tensile Strength".

A realização dos ensaios para a avaliação do comportamento mecânico tem como objetivo a determinação de valores que, posteriormente, permitam a sua comparação com os valores obtidos de outros materiais para os mesmos ensaios ou variações de parâmetros possíveis de se realizar na própria soldadura. Os ensaios de "Roller Peel", "Shear Tensile Strength" (ensaio de corte) e "Direct Tensile Strength", são os que melhor permitem a caracterização da soldadura por pontos através da aplicação de diferentes esforços aplicados, [1], [20], [31].

Desta forma, os ensaios de "Shear Tensile Strength" (a) e "Direct Tensile Strength" (b), tal como apresentados na figura 19, permitem a aplicação de esforços de corte e de tração, respetivamente, nos pontos de soldadura.

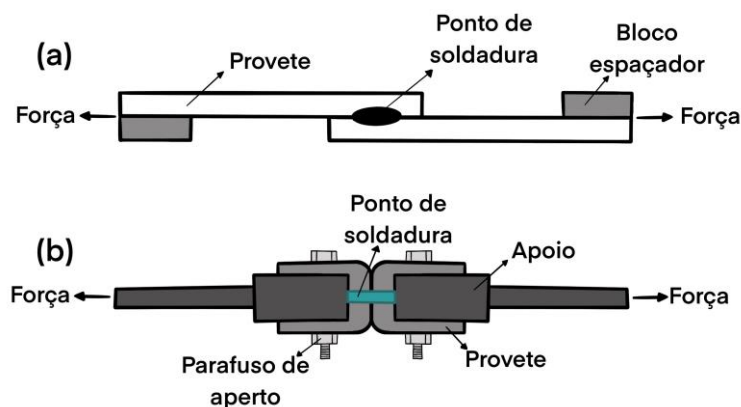


Figura 19 – Representação esquemática dos ensaios de "Shear Tensile Strength" (a) e "Direct Tensile Strength" (b). Adaptado de [1], [20]

O ensaio de "Roller Peel" apresenta-se como uma variação do ensaio previamente referido, "Peel", na medida em que se aplica um equipamento específico em volta dos provetes a ensaiar, tal como representado na figura 20. Devido à variação de aplicação da força, os provetes ensaiados por este método tendem a obter rotura nas zonas termicamente afetadas, ao contrário da zona dos pontos, como nos dois ensaios anteriores.

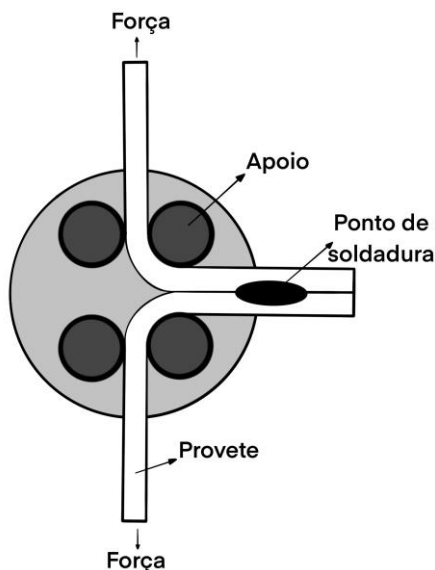


Figura 20 – Representação esquemática do ensaio de “Roller Peel”. Adaptado de [31]

2.2. Parâmetros e a sua influência

Neste método de soldadura é necessário referir o aparecimento de duas categorias de parâmetros mais influentes: os parâmetros referentes ao equipamento e os referentes ao material a soldar.

Nos parâmetros do equipamento existem quatro principais: força, corrente elétrica, geometria do eletrodo e os tempos dos diferentes ciclos de soldadura, entre estes, o tempo de soldadura e o tempo de aperto dos eletrodos após a descarga elétrica, [6]. Estudos realizados com base na melhoria dos parâmetros de soldadura, demonstraram que o parâmetro de intensidade de corrente apresenta o maior nível de eficácia quando alterado, ou seja, apresenta maiores variações na qualidade de soldadura quando alterado. Em seguida apresenta-se o tempo de aperto dos eletrodos após a realização da soldadura, o tempo de soldadura e por fim a força do eletrodo, [14].

Em relação ao material, as propriedades do mesmo e a espessura das chapas são as variantes mais importantes, sendo também necessário ter em atenção os revestimentos superficiais aplicados.

Apesar da distinção entre os parâmetros referentes ao processo e os parâmetros referentes aos materiais, existe um parâmetro que se encontra bastante influenciado pelos restantes parâmetros, sendo este o espaçamento mínimo entre os diferentes pontos de soldadura.

- **Força do eletrodo**

A pressão do eletrodo é um dos parâmetros mais influentes na qualidade final da soldadura, não podendo este ser muito reduzido nem muito elevado. Valores muito reduzidos de pressão não permitem uma correta ligação das chapas, no entanto valores muito elevados levam a reduções da energia térmica transferida. Esta redução da transferência de energia térmica implica um aumento da corrente de soldadura para que, desta forma, não ocorre a diminuição do “nugget” de soldadura devido à redução da penetração e da área de soldadura, [57].

Ao longo dos estudos realizados sobre este processo, foi determinado como valor médio de referência para a força de soldadura, 90N/mm^2 , [58], [59]. Este valor permite o aparecimento de uma depressão no ponto de soldadura, sendo necessário proceder a alterações deste parâmetro quando esta depressão apresentar uma profundidade superior a 25% da espessura da chapa a soldar, [60].

Estudos realizados por [61] com base na soldadura de chapas dissimilares com 1 mm de espessura em aço inoxidável e aço de baixo teor em carbono, demonstraram graficamente, a variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro da indentação com a variação da força dos elétrodo, encontrando-se este gráfico representado na figura 21. Este estudo também permitiu obter gráficos semelhantes para os parâmetros de intensidade de corrente e de tempo de soldadura, apresentando-se estes nas figuras 22 e 23.

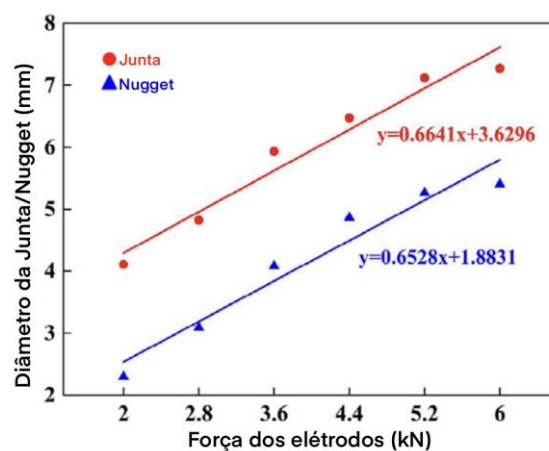


Figura 21 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do elétrodo com a variação da força aplicada nos elétrodo. Adaptado de [61]

- **Intensidade de corrente**

A intensidade de corrente escolhida tem por base o equipamento de soldadura utilizado e o material que se pretende soldar. No equipamento existe um valor de base máximo, podendo ser determinada uma percentagem desse valor para ser aplicado na soldadura em questão.

Na maioria dos casos, e de forma a promover a longevidade do equipamento de soldadura, tem-se por base uma percentagem de utilização de 70 a 90% da corrente útil do mesmo. Para permitir a correta soldadura sem o aparecimento de salpicos provenientes de um valor demasiado elevado. Quando se dá o aparecimento de salpicos na soldadura, o elétrodo em aplicação pode fundir e ficar soldado aos componentes que se pretende soldar, [58], [59].

Para a correta escolha da intensidade de corrente, um dos métodos mais usuais tem por base o aumento gradual da corrente até ao aparecimento de salpicos na soldadura. O aparecimento dos salpicos é um indicador do correto valor de intensidade de corrente para as condições de soldadura em questão, [59].

O gráfico apresentado na figura 22, apresenta, tal como referido previamente no parâmetro da força do eletrodo, a variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro de indentação para a variação da intensidade da corrente, [61].

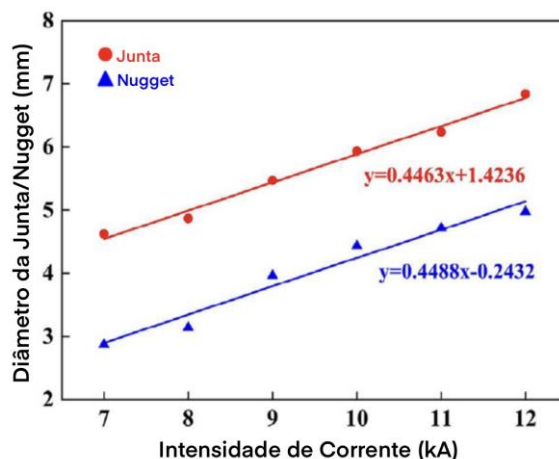


Figura 22 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do eletrodo com a variação da intensidade de corrente. Adaptado de [61]

Ensaio de fadiga a soldaduras por pontos realizadas em aços *dual-phase* constituídos por ferrite e martensite, demonstraram que, em valores de corrente muito baixos, ou seja, valores entre 6,5 e 7,5 kA, o seu aumento promove um elevado aumento na resistência à fadiga da junta. Ao contrário do esperado, valores de corrente superiores a 7,5 kA, diminuíram a resistência à fadiga das juntas testadas, [62].

- **Diâmetro do eletrodo**

A escolha do eletrodo tem por base o material de fabrico, a sua geometria e o diâmetro do mesmo, sendo este último parâmetro crítico para a correta determinação da força aplicada na soldadura. Desta forma, é necessário perceber-se qual o valor esperado para o diâmetro do “nugget” mediante as espessuras das chapas que se pretendem soldar. Este valor pode ser calculado com base na equação 2.

$$D = 5 * e^{1/2} \quad (2)$$

Esta equação permite determinar um valor aproximado do diâmetro do “nugget” e assim uma correta escolha do diâmetro do eletrodo. Desta forma, e pretendendo-se obter um diâmetro de “nugget” de, por exemplo, 5 mm, um eletrodo de 6 mm é usado, [58], [59].

- **Tempo de ciclo**

Tal como previamente referido, existem 3 etapas presentes neste processo de soldadura, sendo então necessário, aquando do estudo do tempo de ciclo do processo, proceder à sua divisão em 3

tempos diferentes. Assim surgem o tempo de aperto, o tempo de soldadura e o tempo de aperto após soldadura.

- **Tempo de aperto**

Este valor define-se como o intervalo temporal desde a aplicação de força nos elétrodos até à aplicação inicial de corrente. Este compasso de espera tem como principal objetivo a obtenção da força de aperto inicialmente definida nos componentes a soldar, [59].

- **Tempo de soldadura**

O tempo de soldadura define-se como o tempo de aplicação da corrente elétrica aos componentes. Este parâmetro mede-se com base em ciclos, sendo necessário o conhecimento prévio da frequência da fonte de alimentação para assim se determinar a quantos segundos equivale um ciclo. Na maioria dos equipamentos a frequência de aplicação é de 50 Hz, sendo um ciclo 1/50 segundos. Um dos métodos utilizados na indústria para o cálculo do número aproximado de ciclos de soldadura tem por base a multiplicação da espessura da chapa que se pretende soldar por 10, ou seja, uma chapa de 1 mm implica 10 ciclos de 50Hz, [58], [59].

Caso a intensidade de corrente seja muito reduzida, o aumento do tempo de soldadura não ira permitir a ocorrência da soldadura, uma vez que, o aquecimento nunca será suficiente para fundir o material. Caso se pretenda aumentar o tamanho do “nugget”, o tempo de soldadura pode ser aumentado, sendo o valor máximo de tempo o que permite o aparecimento de um diâmetro de “nugget” aproximadamente igual ao diâmetro do eletrodo em uso, [59].

O gráfico da figura 23 apresenta a variação de diâmetro do “nugget” e do diâmetro da indentação do eletrodo com a variação do tempo de ciclo na soldadura de ligas dissimilares de aço, aço inoxidável e aço de baixo carbono.

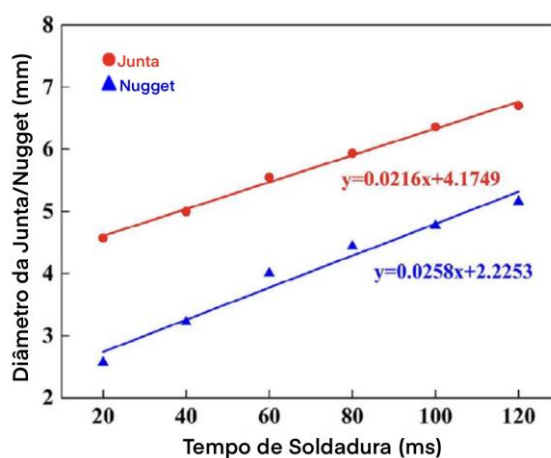


Figura 23 – Gráfico representativo da variação do diâmetro do “nugget” e do diâmetro do eletrodo com a variação do tempo de soldadura. Adaptado de [61]

Estudos realizados por [63] em Titânio comercial puro demonstraram melhorias na tensão de corte dos provetes com o aumento do tempo de soldadura em congruência com o aumento da força do eletrodo. Os ensaios realizados permitiram perceber que o tempo de soldadura se apresentou como o parâmetro mais influente no caso da soldadura por pontos deste material.

- **Tempo de aperto após soldadura**

O tempo de aperto após soldadura consiste na contínua aplicação de força dos eletrodos nos componentes soldados enquanto estes arrefecem. Este parâmetro tem especial importância neste método de soldadura, uma vez que, valores muito baixos podem permitir deslizamento dos componentes e valores muito elevados levam ao aquecimento dos eletrodos por transferência térmica e assim a um maior desgaste dos mesmos, [58].

No caso da soldadura dos aços determinou-se que, valores muito elevados deste parâmetro em congruência com percentagens de carbono superiores a 0,1%, levam ao aparecimento de fragilidades nos “*nuggets*”, [59].

- **Espaçamento entre pontos de soldadura**

Um dos parâmetros mais variável, tem por base a distância de soldadura entre os diferentes pontos, sendo este maioritariamente definido pela aplicação em questão. Apesar desta elevada variabilidade, a escolha correta deste valor interfere com o aparecimento das diferentes zonas presentes na microestrutura final da soldadura, o que é um estudo importante para a aplicação deste processo.

Estudos realizados neste parâmetro demonstraram o aparecimento de um fenómeno denominado “*shunt*”, ou desvio, que ocorre quando são soldados pontos com distanciamentos muito próximos, figura 21. Esta aproximação dos pontos leva a, na soldadura do segundo ponto, um desvio da corrente elétrica pelo primeiro ponto realizado, originando a uma redução da intensidade de corrente de um ponto para o seguinte e consequente redução da dimensão do “*nugget*” e das propriedades mecânicas, tais como, a tensão de rotura, [64], [65].

O fenómeno de desvio de corrente é diretamente influenciado pela capacidade de condução elétrica dos materiais, ou seja, quanto maior for a capacidade de condução elétrica do material, maior será o espaçamento mínimo entre pontos necessário para que não ocorra este desvio. Com esta condicionante a um espaçamento mínimo de 25 mm foi definido como correto para a maioria dos materiais possíveis de se soldar.

Apesar destes estudos, em certas aplicações industriais, torna-se necessária a utilização de distâncias entre soldaduras mais reduzidas. Nestas situações, após a realização do primeiro ponto de soldadura, procede-se ao aumento da intensidade de corrente para as soldaduras consequentes, reduzindo assim o fenómeno de desvio de corrente, [64]. Este aumento de corrente elétrica torna-se mais influente em ligas de alumínio quando comparado com o aumento da distância entre

pontos, ao contrário das soldaduras realizadas em aço, onde ambos os métodos apresentam resultados favoráveis, [66].

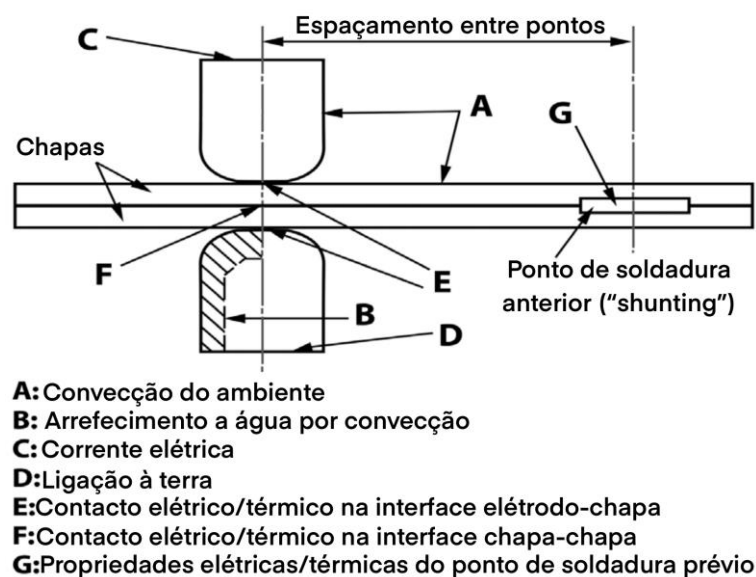


Figura 24 – Fenómeno de desvio de corrente elétrica no processo de soldadura por pontos. Adaptado de [65]

Estudos realizados por [67] em chapas de 1 mm de alumínio 2219 demonstraram a variação da dimensão do “nugget” e das diferentes zonas de microestrutura obtidas com o afastamento dos pontos de soldadura. Neste caso foram realizados dois estudos com parâmetros dispares, sendo no primeiro, figura 25, mantidos os parâmetros de intensidade de corrente, 22,5 kA, tempo de soldadura, 6 ciclos, e força, 2,5 kN, variando-se a distância entre pontos de soldadura, neste caso 5 mm (a) e 20 mm (b).

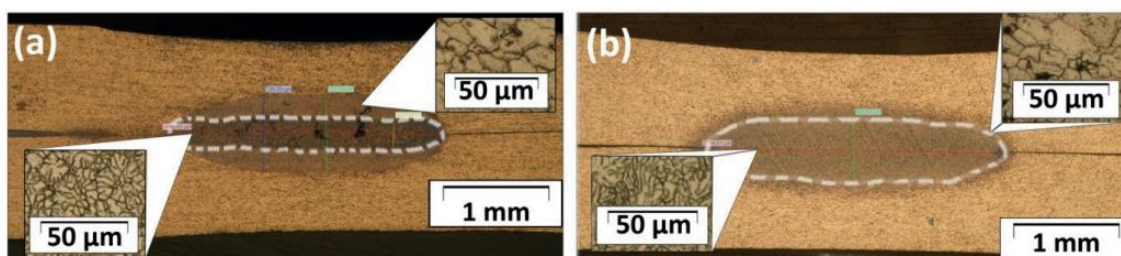


Figura 25 – Corte na zona central do ponto de soldadura realizado em alumínio 2219 com 22,4 kA de intensidade de corrente, 6 ciclos de tempo de soldadura e espaçamento entre pontos de 5 mm (a) e 20 mm (b). Imagens macroscópicas apresentam ampliação de 25x e microestruturas de 500x. Linha tracejada representa uma aproximação entre a fronteira do “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ).

Adaptado de [67]

No segundo ensaio, figura 26, foram estabelecidos diferentes parâmetros gerais para a soldadura, sendo a intensidade de corrente 25,3 kA, o tempo de soldadura 6 ciclos, e a força 3,2 kN. Para este ensaio os autores mantiveram a distância de soldadura entre pontos de 5 mm (a) e 20 mm (b).

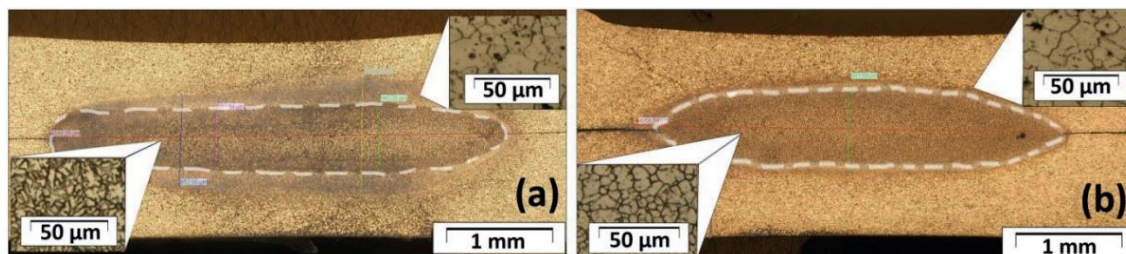


Figura 26 – Corte na zona central do ponto de soldadura realizado em alumínio 2219 com 25,3 kA de intensidade de corrente, 6 ciclos de tempo de soldadura e espaçamento entre pontos de 5 mm (a) e 20 mm (b). Imagens macroscópicas apresentam ampliação de 25x e microestruturas de 500x. Linha tracejada representa uma aproximação entre a fronteira do “nugget” e a zona termicamente afetada (HAZ).

Adaptado de [67]

Este estudo permitiu concluir a influência da distância entre pontos de soldadura e a sua influência na dimensão do “nugget” e da zona termicamente afetada ou zona afetada pelo calor (ZTA). Assim, a diminuição do espaçamento não demonstrou variações significativas no diâmetro do “nugget”, mas sim na sua altura, sendo esta significativamente reduzida. A zona termicamente afetada nos pontos de soldadura realizados com distâncias mais próximas também se demonstrou mais elevada.

Noutro estudo realizado por [68], os autores conseguiram concluir que a distancia mínima entre pontos de soldadura aumento com o aumento das espessuras das chapas, assim como, um aumento do tempo de soldadura promove uma diminuição do efeito de desvio da corrente elétrica.

Em seguimento ao estudo previamente referido, outros autores [66], realizaram um estudo com base no espaçamento entre pontos de soldadura com recursos a ligas de alumínio dissimilares. Assim, os autores determinaram a solda de duas espessuras de chapa diferentes em duas ligas de alumínio diferente, sendo uma chapa de 2 mm em AA5A06 e outra de 6 mm em AA2219.

Os pontos de soldadura foram realizados com 6 espaçamentos entre estes variados: 12, 16, 20, 24, 28 e 40 mm. Na figura 27 é possível observar os resultados dos diâmetros de “nugget” obtidos para os diferentes espaçamentos.

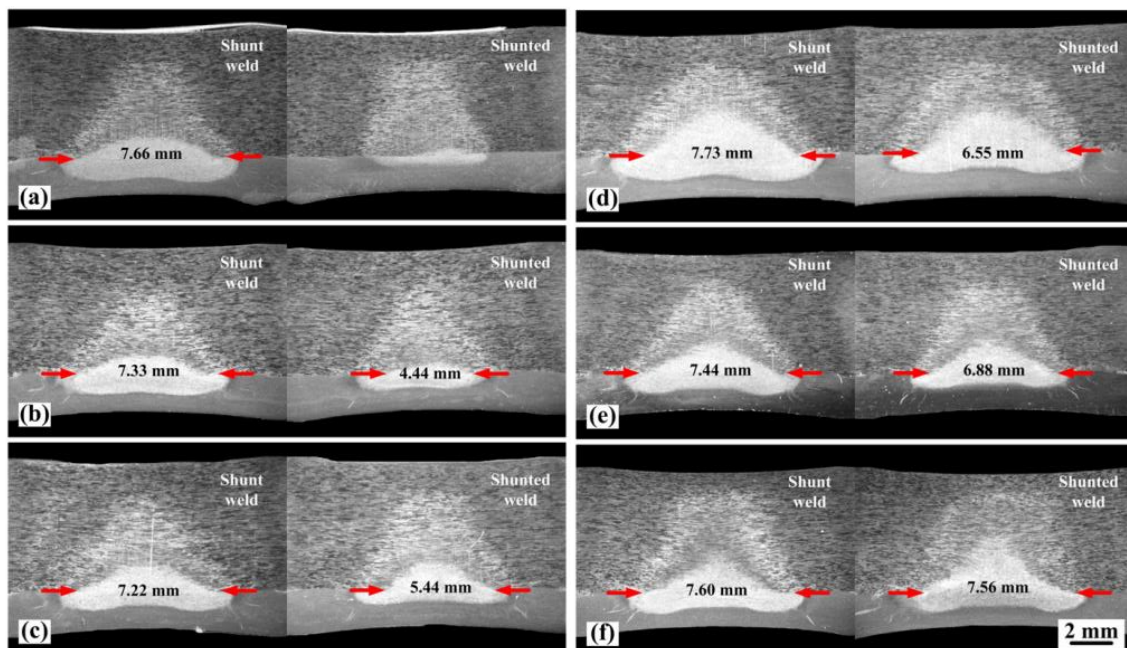


Figura 27 – Variação do diâmetro de “nugget” de soldadura para o ponto inicial, “shunt”, e o ponto de desvio de corrente, “shunted”, com diferentes espaçamentos entre ambos: (a) 12 mm; (b) 16 mm; (c) 20 mm; (d) 24 mm; (e) 28 mm; (f) 40 mm

Este estudo demonstrou uma redução muito pronunciada dos diâmetros de “nugget” para distâncias entre pontos iguais ou inferiores a 20 mm, sendo esta aproximadamente 2 ou mais milímetros por diâmetro. Nas distâncias entre soldaduras iguais ou superiores a 24 mm, esta variação de diâmetro foi aproximadamente igual ou inferior a 1 mm. Através destes ensaios foi possível comprovar o valor mínimo determinado entre pontos de soldadura de 25 mm.

Um estudo realizado por [65] comprovou o efeito do desvio de corrente com a aproximação dos pontos de soldadura, através da medição do diâmetro do “nugget” em pontos de soldadura realizados após a existência prévia de outro ponto soldado anteriormente. Este estudo foi compilado num gráfico apresentado na figura 25. Neste trabalho os autores recorreram a chapas da liga de alumínio 2219 com 1 mm de espessura.

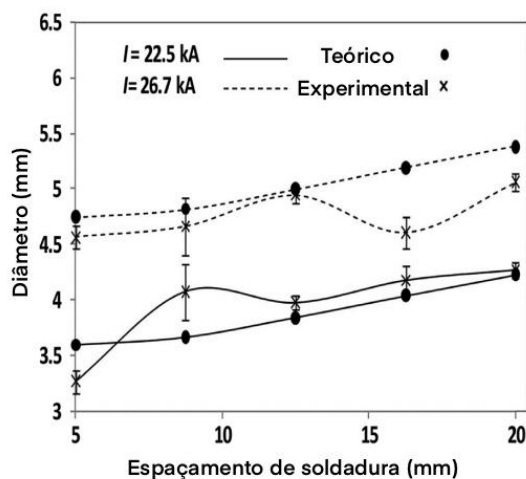


Figura 28 – Variação do diâmetro do “nugget” com a distância entre pontos de soldadura. Adaptado de [65]

2.2.1 Parâmetros ótimos com base em estudos realizados

Devido ao número elevado de parâmetros influentes no processo de soldadura por pontos, existem diversos estudos que permitem obter os melhores parâmetros para soldar certos materiais em certas espessuras, sem procederem ao estudo da influência dos diferentes parâmetros. Desta forma, foi realizada uma tabela, 2, onde se apresentam alguns destes estudos, assim como os materiais e os melhores parâmetros atingidos pelos diversos autores.

Tabela 2 – Parâmetros ótimos definidos através de estudos realizados por diversos autores.
Adaptado de [13], [69]–[71]

Materiais	Autores	Força do elétrodo (kN)	Intensidade de corrente (kA)	Tempo de aperto dos elétrodos (ciclos)	Tempo de Soldadura (ciclos)
Galvanized Chromate Steel	S. Aslanlar; A. Ogur;	6,0000	10,0000	25,0000	12 e 15
	U. Ozsarac; E. Ilhan [13]	6,0000	12,0000	25,0000	15
AISI 1018	P. Ravichandran; C. Anbu	9,2196	8,6818	10,0634	8,7984
AISI 430 Ferrítico	B. Meenakshipriya;	9,5647	8,0023	14,7520	6,3182
	S. Sathiyavathi [69]				
Titânio Puro Comercial	Yakup Kaya; Nizamettin Kahraman [70]	6,0000	7,0000	30,0000	30,0000
Aço de baixo teor em carbono	Farizah Adliza Ghazali; Yupiter HP Manurung; Mohamed Ackiel Mohamed [71]	2,3000	10,0000	Não definido	10,0000

2.3. Microestrutura

A realização de uma análise microestrutura permite, nas diferentes zonas constituintes do ponto de soldadura, perceber as estruturas formadas e os posicionamentos dos elementos de liga. Desta forma, e através de estudos realizados por outros autores posteriormente apresentados, foram identificadas as variações entre as diferentes zonas nomeadamente em termos de estruturas.

No estudo elaborado por [30] com pontos de soldadura realizados em chapas de 0,8 mm de aço de baixo teor em carbono foi possível observar uma transição de estruturas desde ferrite e quantidades reduzidas de cementite (Fe_3C) no material de base para um estrutura quase inteiramente formada por martensite. Esta variação da microestrutura apresenta-se na figura 29.

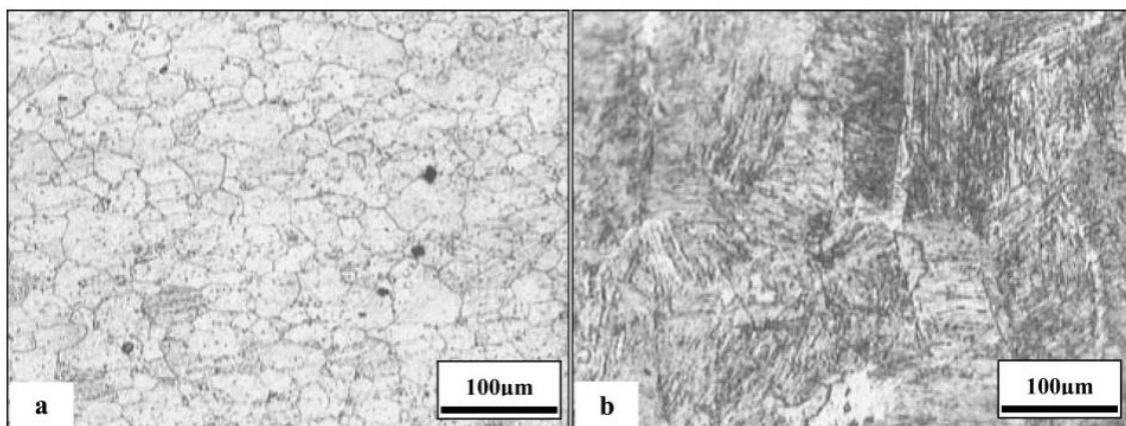


Figura 29 – Microestrutura proveniente da soldadura por pontos de chapas de 0,8 mm em aço de baixo carbono: material de base (a); Zona central do ponto de soldadura (b). Adaptado de [30]

Através do estudo referido, [61], os autores realizaram uma análise da microestrutura resultante com base em imagens retiradas do Microscópio Eletrônico de Varrimento. Na figura 30 é possível observar as diferentes estruturas formadas, na zona superior no aço inoxidável e na zona inferior o aço de baixo teor em carbono.

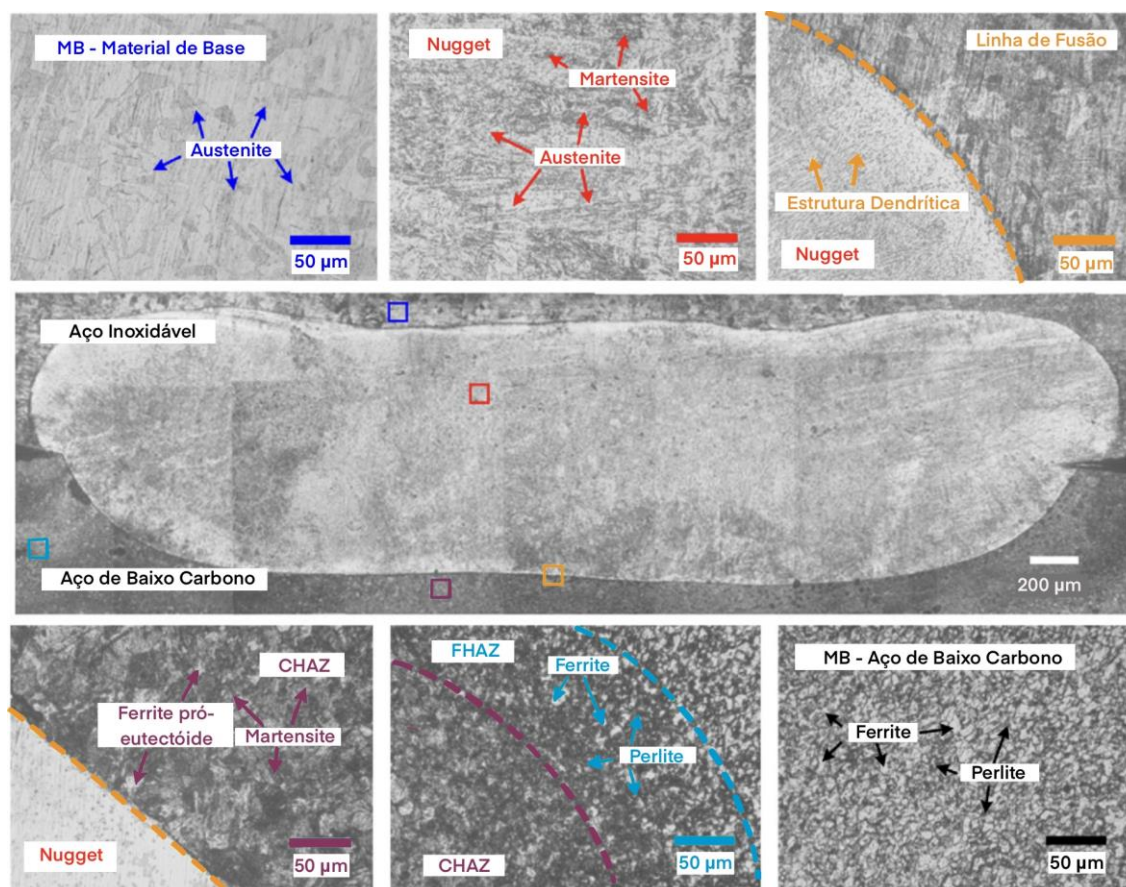


Figura 30 – Imagens da microestrutura resultante entre a soldadura por pontos de duas ligas de aço dissimilares, aço inoxidável (zona superior) e aço de baixa liga (zona inferior). Adaptado de [61]

Através destas imagens foi possível aos autores concluir o aparecimento de 5 zonas de estrutura variada: “*nugget*” (austenite e martensite); CHAZ (ferrite pró-eutetóide e martensite); FHAZ (ferrite e perlite); BM do aço inoxidável (austenite) e BM do aço de baixo carbono (ferrite e perlite). Um aumento da dimensão do “*nugget*” na chapa de aço inoxidável quando comparada com a chapa de aço de baixo carbono foi também identificado, sendo esta diferença proveniente das diferenças entre a condutividade térmica e elétrica de um e outro.

Estudos realizados em ligas similares de alumínio, [67], realizados em chapas da liga AA2219, demonstraram a variação do posicionamento dos elementos de liga com base no distanciamento entre pontos de soldadura, tal como representado nas figuras 31 e 32.

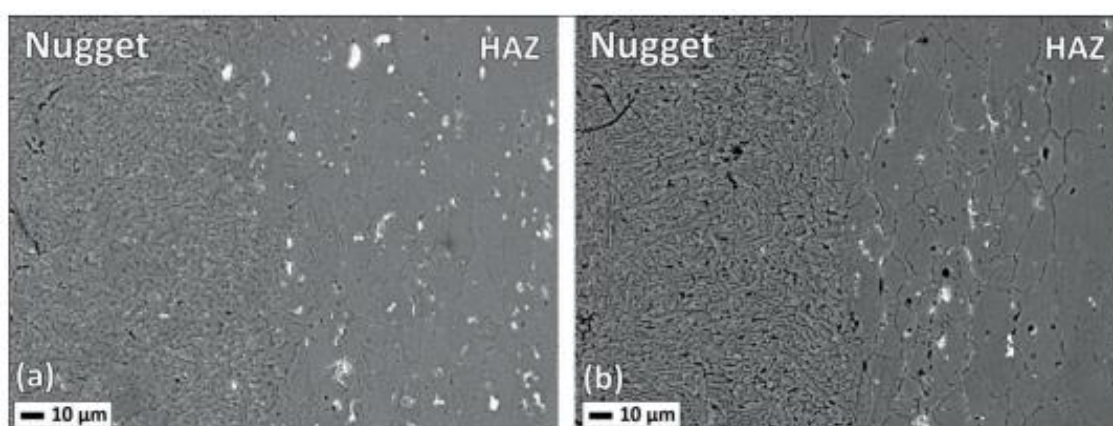


Figura 31 – Imagens obtidas através do Microscópio de Varrimento Eletrónico (aproximação de 500x) da secção de corte do ponto de soldadura demonstrando o “*nugget*” e a zona termicamente afetada (HAZ); 23,5 kA de intensidade de corrente e 6 ciclos de soldadura; espaçamento entre pontos: 5 mm(a); 20 mm (b). Adaptado de [67]

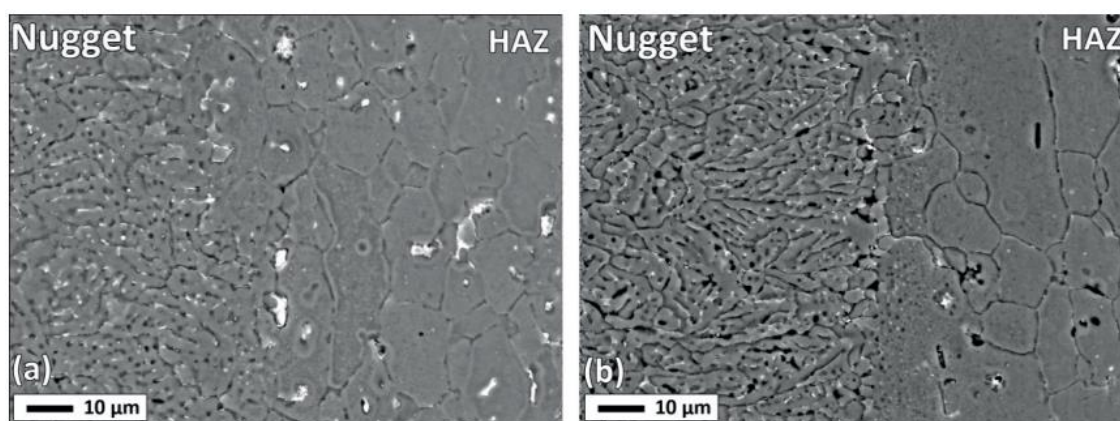


Figura 32 – Imagens obtidas através do Microscópio de Varrimento Eletrónico (aproximação de 500x) da secção de corte do ponto de soldadura demonstrando o “*nugget*” e a zona termicamente afetada (HAZ); 25,3 kA de intensidade de corrente e 6 ciclos de soldadura; espaçamento entre pontos: 5 mm(a); 20 mm (b). Adaptado de [67]

Através deste estudo foi notório uma variação do posicionamento dos elementos de liga entre distâncias diferentes de pontos. Assim, os autores concluíram que, na zona termicamente afetada, zona mais visível, um aumento da distância de soldadura promove uma separação dos elementos de liga pelas diferentes fronteiras de grão, sendo este fenômeno visível pelas zonas brancas das imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varrimento. O aumento do espaçamento permitiu, com base na manutenção dos parâmetros de soldadura, identificar um aumento da temperatura de soldadura, e assim um maior refinamento do grão, [67].

Na soldadura de ligas dissimilares de alumínio, foi realizado um estudo por [72], usando chapas de 4 mm de espessura de 2195-T8 e 2 mm de 5A06-O, onde os autores procederam ao estudo da microestrutura nas diferentes zonas presentes na soldadura, tal como apresentado na figura 33.

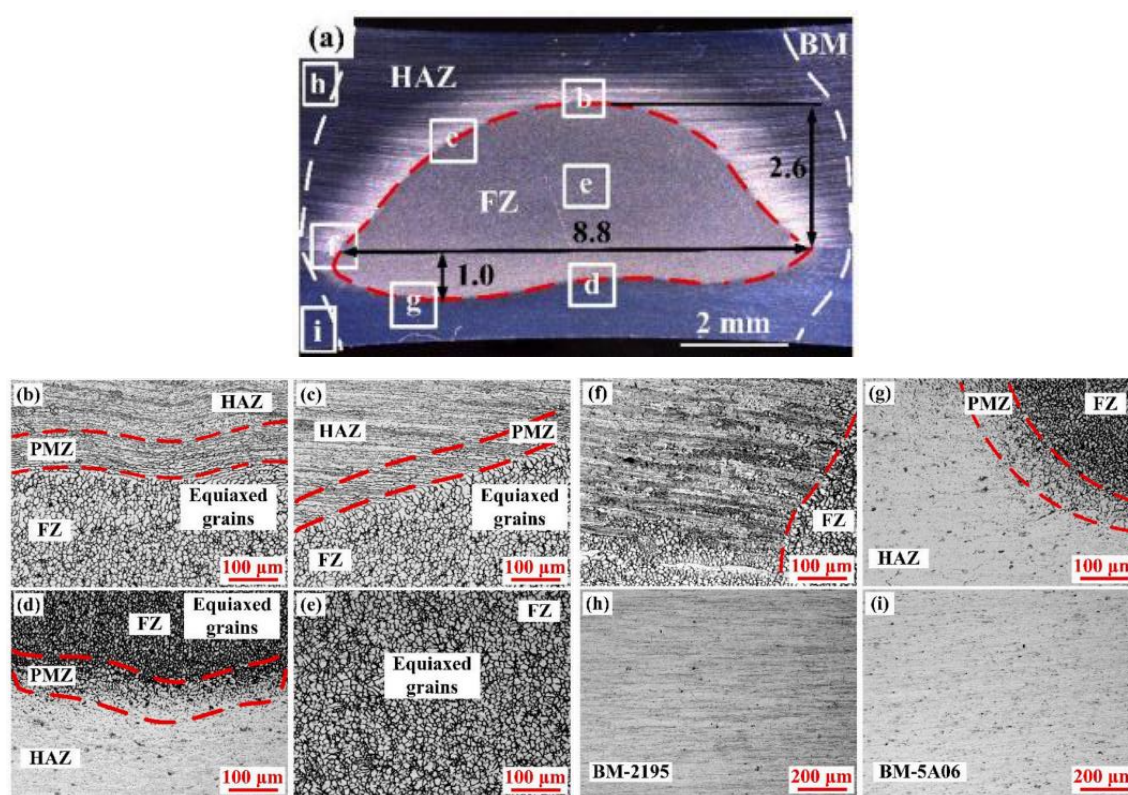


Figura 33 – Imagens da macroestrutura e microestrutura do seção central do ponto de soldadura realizado em ligas de alumínio dissimilares de 2195 (espessura 4 mm) e 5A06 (espessura 2 mm). Adaptado de [72]

Este estudo demonstrou a variação de estrutura entre as diferentes zonas, material de base, zona termicamente afetada e zona de fusão, sendo possível perceber a existência de um maior refinamento de grão desde o material de base e a zona de fusão. Na zona de fusão não é visível o aparecimento de fendas ou poros provenientes do arrefecimento do material demonstrando uma correta aplicação dos diferentes parâmetros de soldadura.

2.4. Microdureza

A análise de microdureza permite, através da comparação dos valores das diferentes zonas existentes na microestrutura identificar se o ponto de soldadura foi corretamente realizado, ou seja, devido à ocorrência de fusão do material é expectável o aparecimento de durezas superiores no centro do ponto aquando da sua comparação com o material de base, [4], [30].

Através do estudo realizado por [4], e tendo por base a soldadura de chapas de 1,2 mm em aço de baixo teor em carbono, foi realizada uma comparação das durezas obtidas nas diferentes zonas de soldadura presentes na microestrutura e em seguida a comparação destes valores com os valores provenientes de uma soldadura sujeita a um pós-tratamento.

Para o pós-tratamento, foi realizado um “*Post Weld Impact Treatment*” (PWIT), que consiste na aplicação de pequenas indentações em toda a área do ponto de soldadura, tal como apresentado na figura 34.

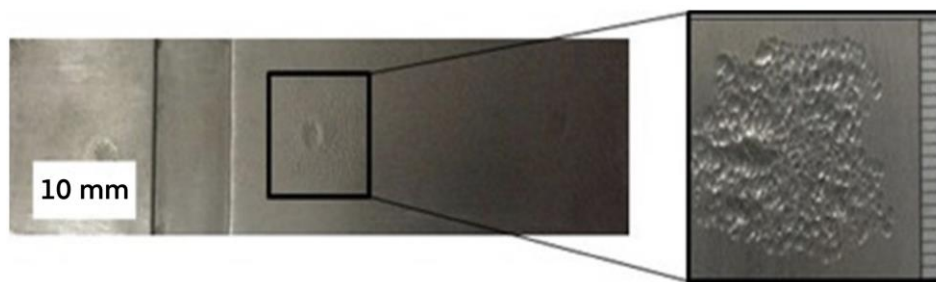


Figura 34 – Aplicação de um PWIT (“*Post Weld Impact Treatment*”) no ponto de soldadura. Adaptado de [4]

A medição das durezas foi realizada com base no método de Dureza Vickers, tendo os autores obtido os valores de 211HV e 268HV, para o ponto de soldadura sem e com pós-tratamento, respetivamente. Estes valores são substancialmente mais elevados que os 150HV obtidos no material de base, demonstrando a correta realização do ponto de soldadura. Este estudo foi também complementado com a realização de um ensaio de corte que demonstrou um aumento da tensão de rotura ao corte nos provetes que apresentam maior dureza do ponto de soldadura, sendo neste caso 8,81 kN em prol dos 8,20 kN dos provetes sem tratamento, [4].

Complementarmente, o estudo realizado por [30] em chapas de aço de baixo carbono de 0,8 mm, demonstrou o aparecimento de uma dureza superior na zona de fusão do ponto de soldadura quando comparado com o material de base. As medições de dureza realizadas permitiram também concluir que a redução da dureza do material ocorre na zona termicamente afetada, tal como demonstrado na figura 35.

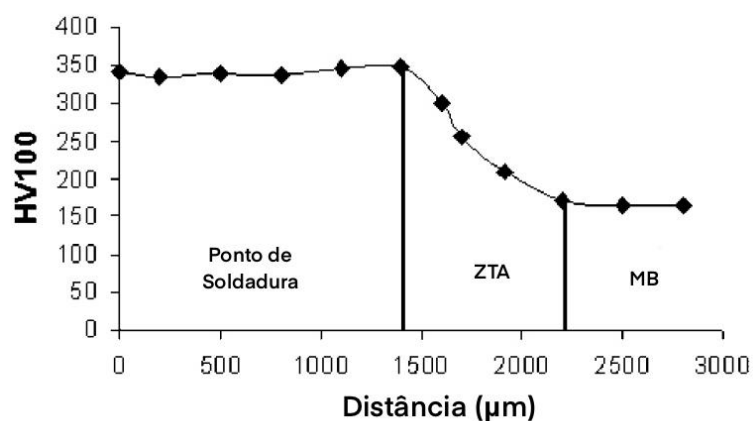


Figura 35 – Gráfico de medição de dureza em Vickers ao longo das diferentes zonas de microestrutura presentes no ponto de soldadura. Adaptado de [30]

Na comparação dos dois estudos é possível observar um valor de dureza para os materiais de base muito semelhantes, sendo aproximadamente 150HV, mas uma variação elevada na dureza máxima observada na zona de fusão, sendo aproximadamente 350HV nos ensaios com chapas de 0,8 mm e 211HV nas chapas de 1,2 mm sem tratamento. Esta variação deve-se, tanto à variação da espessura de chapa como à variação dos parâmetros de soldadura aplicados, sendo então notório uma melhoria na soldadura de chapas mais finas, tal como inicialmente expectável devido à maior facilidade de realização de soldadura destas.

2.5. Influência dos pré-tratamentos superficiais

Uma das variações menos referenciadas no estudo da soldadura de resistência por pontos tem por base os pré-tratamentos superficiais de forma a permitir o controlo da espessura da camada de óxidos presentes nos materiais de base, tais como, alumínio e aço. Esta variação da espessura da camada de óxidos é especialmente relevante aquando do estudo da soldadura de chapas em ligas de alumínio, uma vez que esta apresenta variações elevadas para este valor, [73].

Um estudo realizado por [73], e com base em chapas de alumínio AA1050 de 0,6; 1,0 e 1,5 mm de espessura, obteve valores comparativos entre a realização de soldaduras por pontos em chapas sem tratamento, em chapas que sofreram “pickling”, e em chapas que sofreram granalhagem em ambos os lados ou apenas nos lados em contacto com os eléctrodos. O processo de granalhagem recorreu a esferas de vidro de 100 μm, lançadas a uma pressão de 200 KPa durante 30 s. A decapagem química, ou “pickling”, foi realizado com Hidróxido de Sódio, NaOH.

A realização de um ataque químico permite a remoção da camada de óxido existente, sem danificar o material de base, apresentando variantes mediante a concentração da solução, temperatura, composição da superfície, tempo de aplicação e velocidade de rotação do líquido, [73]–[75].

Através deste estudo foi notória uma variação do tempo de vida dos eléctrodos e da capacidade de soldabilidade das chapas mediante a variação da superfície, sendo o processo de granalhagem o

que permite a maior redução da solda dos elétrodos aos componentes a ligar e um aumento da vida útil dos mesmos. Esta redução tem por base um aumento da rugosidade promovido pelo próprio processo de granalhagem.

Os valores de tensão de rotura apresentaram-se mais elevados nos provetes que sofreram ataque químico, e posteriormente nos de material de base e por fim nos provetes que sofreram granalhagem. Entre os provetes de granalhagem, os que sofreram granalhagem total apresentam os piores valores de tensão de rotura, [73].

A figura 36 representa a variação superficial das chapas de alumínio AA5042, antes e após a realização de um ataque químico que permitiu a remoção do filme de óxido, [76].

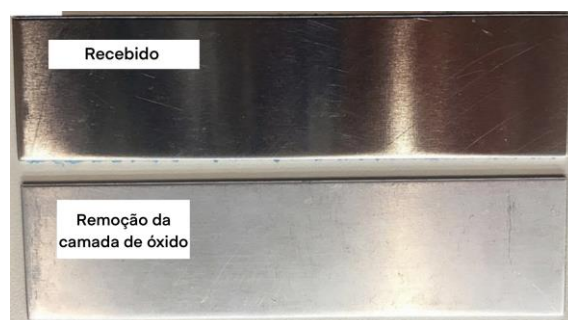


Figura 36 – Efeito da aplicação de um ataque químico na superfície de uma chapa de alumínio de AA5042. Adaptado de [76]

2.6. Método de Taguchi

O Método de Taguchi consiste num método estatístico de análise numérica com o objetivo de, apenas com a utilização de um único método, permitir o estudo de design de sistemas, de parâmetros e de tolerâncias. Desta forma, o seu uso tem por base a redução dos tempos de ciclos de desenvolvimento de um produto e assim levar a redução de custos de todo o processo de desenvolvimento e fabrico e aumento dos lucros finais. Para além destas vantagens, uma vez que para a realização não são necessários variações numerosas e diversos ensaios torna-se bastante atrativo a nível empresarial, [1], [77].

Para a implementação de um plano de experiências de Taguchi é necessária a realização de uma matriz ortogonal (OA – “*Orthogonal Array*”), para permitir a redução do número de combinações necessárias utilizando apenas aquelas que, após análise estatística, permitem a melhor combinação de parâmetros a ensaiar. Uma vez que se limita o número de combinações testadas, os melhores parâmetros apresentam-se, normalmente, como uma combinação dos valores de diferentes combinações, [1], [62], [77], [78].

A matriz ortogonal, representada na tabela 3, apresenta um arranjo ortogonal de Taguchi, onde P são os fatores (“*parameters*”) e L o número de níveis (“*levels*”). O número de parâmetros tem por base as variáveis escolhidas para o ensaio, enquanto os níveis representam o número de valores

que se irá testar para cada parâmetro. O número de combinações é determinado com base nestes dois fatores, sendo sempre um número fixo mediante o número de parâmetros e níveis previamente determinados. A coluna denominada de resultado tem por base, mediante o ensaio que se pretende, por exemplo ensaio de corte, o valor obtido para este ensaio naquela combinação de parâmetros, [1], [62], [77]–[79].

Existem ainda estudos realizados que determinar não um valor para os resultados, mas dois com base em dois ensaios, demonstrando a amplitude de utilização deste método, [71].

Neste caso, os valores referentes aos parâmetros são denominados por a , b e c e os valores referentes aos níveis por 1 e 2.

Tabela 3 – Arranjo ortogonal para a realização do Método de Taguchi; $P = 3$ e $L = 2$. Adaptado de [79]

Método de Taguchi – $P = 3$; $L = 2$				
Combinação	a	b	c	Resultado (X)
1	1	1	1	X_1
2	1	2	2	X_2
3	2	1	2	X_3
4	2	2	1	X_4

O Método de Taguchi permite, também, além da identificação dos melhores parâmetros para o método em estudo, identificar quais os parâmetros mais influentes na situação em estudo, sendo esta influência medida através da utilização de um rácio denominado “*signal-to-noise*”. Este rácio é utilizado para se identificar os fatores de controlo que permitem a redução mais substancial da variabilidade do produto ou processo em examinação, através dos fatores de controlo que não são possíveis de controlar aquando da realização deste estudo em ambiente pré-determinado, [62], [80].

Desta forma, existem duas categorias de fatores, os fatores de controlo, ou também denominados fatores de sinal, e os fatores de ruído, sendo os primeiros todos os fatores possíveis de controlar em todas as situações, e os segundos apenas possíveis de controlar em ambiente experimental. Para analisar os diferentes valores provenientes do rácio S/N tem-se por base a premissa que valores mais elevados identificam fatores de controlo que permitem uma maior redução dos efeitos dos fatores de ruído, [62], [80].

Estudos realizados por [1] em chapas de aço com baixo teor em carbono, com duas espessuras diferentes, 0,8 mm e 1 mm, permitiram, com base no Método de Taguchi, determinar os melhores parâmetros de soldadura para os dois ensaios, assim como a percentagem de influência dos diferentes parâmetros testados: intensidade de corrente, força do elétrodo e tempo de soldadura. Para este estudo os autores realizaram 2 matrizes de Taguchi, uma vez que, apesar de terem por

base os mesmos valores para os diferentes níveis dos fatores, realizaram estudos independentes para os dois ensaios, ensaio de corte e “*Direct Tensile Strenght*”.

Uma vez realizada a análise estatística, os autores identificaram a percentagem de influência de cada parâmetro por ensaio, tal como representado a tabela 4, sendo no ensaio de “*Direct Tensile Strenght*” a ordem dos parâmetros mais influentes: tempo de soldadura, intensidade de corrente e força do elétrodo, apresentando-se estes do mais influente para o menos, respetivamente. No ensaio de corte a ordem recebe alterações, sendo o mais influente o tempo de soldadura e posteriormente a intensidade de corrente, terminando na força do elétrodo.

A realização destes cálculos tem por base uma análise de variância dos parâmetros, também determinada ANOVA (“*Analysis of Variance*”).

Tabela 4 – Percentagens de influência dos parâmetros de soldadura: intensidade de corte, força dos elétrodos e tempo de soldadura, com base no método de Taguchi para os ensaios de corte e “*Direct Tensile Strenght*”. Adaptado de [1]

Parâmetro do Processo	Ensaio Realizado	
	<i>Ensaio de Corte</i>	<i>Direct Tensile Strenght</i>
Força do Elétrodo	4,745	7,943
Intensidade de Corrente	72,792	15,667
Tempo de Soldadura	22,260	74,702
Erro	0,203	1,668

A realização deste estudo permitiu identificar a versatilidade da utilização deste método, uma vez que, apesar de os autores terem por base os mesmos parâmetros, fatores, a influência destes mediante o ensaio, apresenta-se bastante variada, tendo ocorrido uma inversão do posicionamento da intensidade de corrente e do tempo de soldadura.

Outro estudo realizado por [71], tendo por base a realização de soldaduras em chapas de 1,2 mm em aço de baixo teor em carbono, demonstrou a aplicação do Método de Taguchi com resposta múltipla, ou seja, foram aplicados no método os resultados provenientes dos ensaios de corte e da medição da dimensão dos “*nugget*”. O ensaio de corte foi realizado com uma velocidade de 2 mm/min.

Desta forma, apesar de ser realizada uma análise com resposta múltipla, os autores atribuíram um nível de importância superior aos valores referentes à tensão de corte quando comparados com os valores da dimensão do “*nugget*”.

Através do uso da metodologia de Taguchi os autores conseguiram definir os melhores parâmetros de soldadura, assim como os valores de rácio S/N para os diferentes fatores nos diferentes níveis, sendo estes apresentados na figura 37.

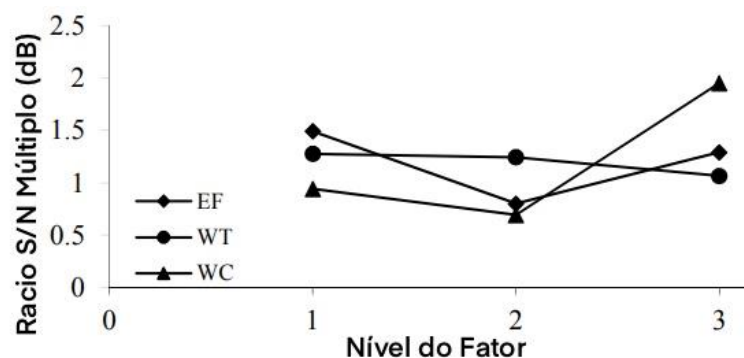


Figura 37 – Gráfico representativo dos efeitos dos fatores de controlo para os diferentes níveis com base no rácio S/N. Adaptado de [71]

Este gráfico permite demonstrar a variabilidade do rácio S/N com a variação dos parâmetros para os diferentes níveis, sendo necessário realizar-se sempre um estudo geral deste rácio e não um especializado por nível, [71].

Através dos dois estudos previamente referidos, é possível obter uma comparação dos parâmetros mais influentes e perceber a adaptabilidade deste método aos parâmetros e ensaio em estudo, uma vez que, neste último, o parâmetro mais influente determinado pelos autores é a força do eletrodo, sendo este o parâmetro menos influente em ambos os ensaios do estudo anterior, [1], [71]

3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar uma descrição sobre todas as etapas de processamento de material e de preparação dos equipamentos, até à realização das soldaduras e posteriores ensaios e medições.

Encontra-se dividido em quatro subcapítulos, sendo que, no primeiro, é apresentada uma descrição de dois ensaios realizados antes do estudo principal referente a este relatório; no segundo identifica-se todo o processo de preparação das chapas e, por fim, descrevem-se as etapas de realização dos diferentes processos, neste caso soldadura no terceiro e ensaios de corte e medições da dureza dos pontos de soldadura no quarto.

3.1. Ensaios complementares ao estudo

Tal como previamente descrito, e de forma a permitir identificar o melhor método para a realização das soldaduras para o estudo principal, realizaram-se dois ensaios prévios, sendo o primeiro relativo ao tratamento superficial e o segundo relativo ao número de pontos de soldadura por provete.

3.1.1. Comparação de tratamentos superficiais

De forma a tentar identificar a variação existente aquando da aplicação de um tratamento superficial nas chapas, realizaram-se ensaios de soldadura em provetes de alumínio com dois diferentes tratamentos superficiais. Os primeiros provetes soldados foram submetidos a uma limpeza de superfície com desengordurante, neste caso, acetona, sendo que, os segundos, foram submetidos a uma granalhagem em ambos os lados das chapas.

Considerando a espessura de chapa de alumínio de 2 mm e tendo por base o equipamento de soldadura CEA NKLT 28 foi realizada a soldadura de um ponto para cada uma das condições de preparação de superfície mantendo-se constantes os parâmetros de soldadura em utilização.

Na figura 38 é possível observar, no provete que sofreu limpeza superficial com desengordurante, o estado interno do ponto de soldadura, “*nugget*”, após a quebra da soldadura, (a), e o entalhe provocado pelo eléctrodo aquando da transmissão da corrente eléctrica, (b). Nestes provetes, apesar de o ponto resultante não ser muito pronunciado, é notório o aparecimento de fusão do material interno, demonstrando que a corrente eléctrica foi corretamente transmitida de um eléctrodo para o outro atravessando ambas as chapas.

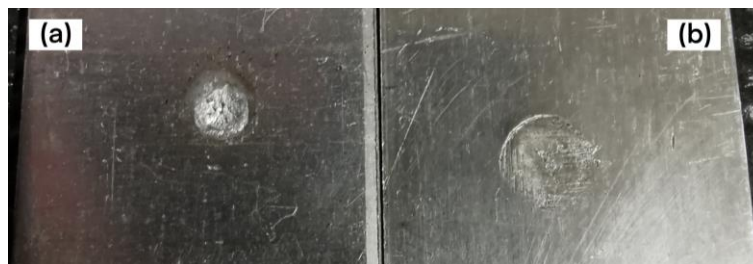


Figura 38 – Visualização da zona interna do ponto de soldadura (a) e do entalhe (b) após a quebra da ligação soldada nas chapas de alumínio que sofreram limpeza superficial com acetona

O provete submetido ao processo de granalhagem apresenta-se na figura 39, onde se observa uma redução da indentação provocada, (b), e a falta de fusão de material na zona interna do “*nugget*”, (a). A não ocorrência de fusão, apesar da manutenção dos parâmetros de soldadura, demonstrou que, a transmissão de corrente neste provete não foi ótima, devendo-se ao aumento da rugosidade superficial provocado pela granalhagem, levando assim a uma redução da área de contacto entre os diferentes materiais.



Figura 39 – Visualização da zona interna do ponto de soldadura (a) e do entalhe (b) após a quebra da ligação soldada nas chapas de alumínio que sofreram granalhagem

Uma vez que, nos provetes que sofreram granalhagem, a fusão das chapas não ocorreu, tornou-se impossível a realização de um ensaio de corte comparador de ambos os tratamentos superficiais. Assim, a realização de uma granalhagem nas chapas previamente à sua soldadura provoca uma redução acentuada da transmissão de corrente e consequentemente a incorreta soldadura das mesmas, não sendo desta forma realizado este processo aquando das soldaduras executadas para o estudo principal.

3.1.2. Realização de dois pontos de soldadura

Inicialmente, e com base em estudos realizados por outros autores, definiu-se a realização de dois pontos de soldadura por provete, uma vez que a colocação destes em paralelo com o eixo de aplicação da força permitia a manutenção da estabilidade dos mesmos, não provocando a rotação das chapas em caso de desalinhamento na soldadura.

Através desta escolha realizaram-se quatro provetes de teste em aço tendo em conta os parâmetros definidos para o método de Taguchi, tabela 9. Selecionou-se assim a realização de provetes de teste baseados as combinações de parâmetros 4, 5, 6 uma vez que estes englobam todos os parâmetros selecionados para a espessura de provete intermédia. Posteriormente realizou-se, também, um provete com a combinação de parâmetros de 9.

Os provetes foram submetidos às etapas do tratamento superficial tal como posteriormente descritas no parágrafo 3.2, sendo apenas variado o espaçador em utilização, tal como apresentado na figura 40, em Software Solidworks à esquerda, (a), e após impressão 3D à direita, (b).

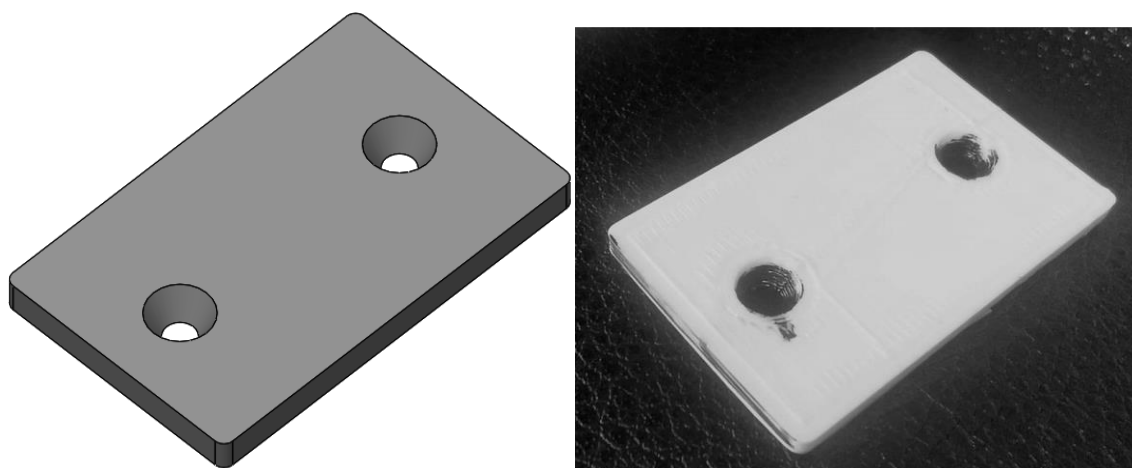


Figura 40 – Espaçador referente à marcação dos dois pontos de soldadura, representação em Software Solidworks (a), e após impressão 3D, (b)

No Apêndice A apresenta-se o desenho técnico referente à realização deste componente e na figura 41, as cotas que se pretendem obter com a utilização do mesmo.

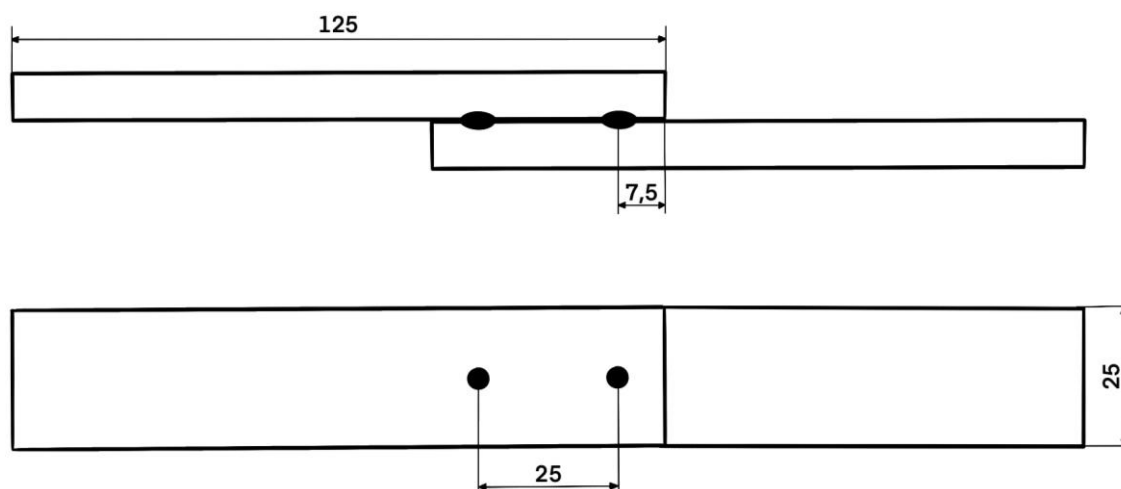


Figura 41 – Representação esquemática da realização da soldadura das chapas com dois pontos de soldadura

Na figura 42 encontram-se representadas as marcações realizadas nos provetes de forma a permitir a sua correta colocação ao longo da realização das diferentes soldaduras.



Figura 42 – Marcação dos pontos de soldadura e linhas de sobreposição nos provetes realizados com dois pontos de soldaduras

Seguindo as etapas de soldadura descritas no parágrafo 3.3 realizaram-se os pontos de soldadura nos provetes, sendo estes posteriormente ensaiados ao corte, tal como descrito em 3.3. A realização destes ensaios permitiu identificar que, devido à menor resistência do material, ocorria a rotura dos provetes na zona da chapa, figura 43, ao invés da rotura nos pontos de soldadura.



Figura 43 – Provetes de aço St12 realizado com base nos parâmetros de (4) do método de Taguchi após submetido ao ensaio de corte

Devido à natureza do ensaio de corte, a quebra dos provetes na zona das chapas não permite identificar as tensões de rotura nem obter comparação entre as diferentes combinações de parâmetros, sendo assim necessário realizar as juntas com apenas um ponto de soldadura.

3.2. Preparação dos Provetes

A realização da preparação dos provetes teve por base um conhecimento prévio proveniente dos ensaios anteriormente referidos, permitindo assim determinar as etapas a seguir, tal como apresentado neste subcapítulo. Apesar da realização dos provetes em dois materiais distintos, aço St12 e alumínio 1050, o seu processamento é muito semelhante, sendo desta forma apresentado em seguida de forma geral com as suas distinções especificadas por material.

Nas tabelas 5 e 6 indicam-se as composições químicas dos materiais utilizados, enquanto na tabela 7 são indicadas as principais propriedades mecânicas.

Tabela 5 – Composição química do aço St12

C	Mn	P	S
< 0,10	< 0,50	< 0,035	< 0,025

Tabela 6 – Composição química do alumínio 1050

Mn	Fe	Cu	Si	Mg	Zn	Ti
<0,05	< 0,40	< 0,05	<0,25	< 0,05	<0,07	<0,05

Tabela 7 – Principais propriedades mecânicas do aço St12 e alumínio 1050

	Deformação (%)	Tensão de Ruptura (MPa)	Dureza Brinell	Temperatura de fusão (°C)
Aço St12	30	305	86	1426
Alumínio 1050	12	105 - 145	34	650

3.2.1. Preparação superficial

Os provetes foram obtidos a partir de chapas de 1,0; 1,5 e 2,0 mm no caso do aço e de chapas de 1,0 mm no caso do alumínio, cortadas nas dimensões de 125x25 mm utilizando uma guilhotina refª ADIRA GM 0410, conforma ilustrado na figura 44.



Figura 44 – Equipamento de corte – ADIRA GM 0410

Posteriormente foi realizada a remoção de óxidos superficiais com recurso a uma lixa de gramagem 500. O resultado é ilustrado na figura 45. A escolha da gramagem da lixa foi realizada na medida em que permite o aumento mínimo da rugosidade superficial sem comprometer a remoção de toda a camada de óxido existente nas chapas.



Figura 45 – Superfície das chapas de aço St12 antes (a) e após (b) a remoção dos óxidos com recurso a uma lixa de gramagem 500

A finalizar, em ambos os materiais, realizou-se uma limpeza superficial de todas as chapas em ambos os lados com recurso a acetona.

3.2.2. Preparação das chapas pré-soldadura

Finalizada a preparação superficial das chapas, iniciaram-se as etapas referentes à realização das soldaduras. Assim, e tal como previamente referido, obtiveram-se componentes por impressão 3D, figura, 46, para permitirem o posicionamento do ponto de soldadura no centro da zona de sobreposição. No Apêndice B apresenta-se o desenho técnico deste componente.

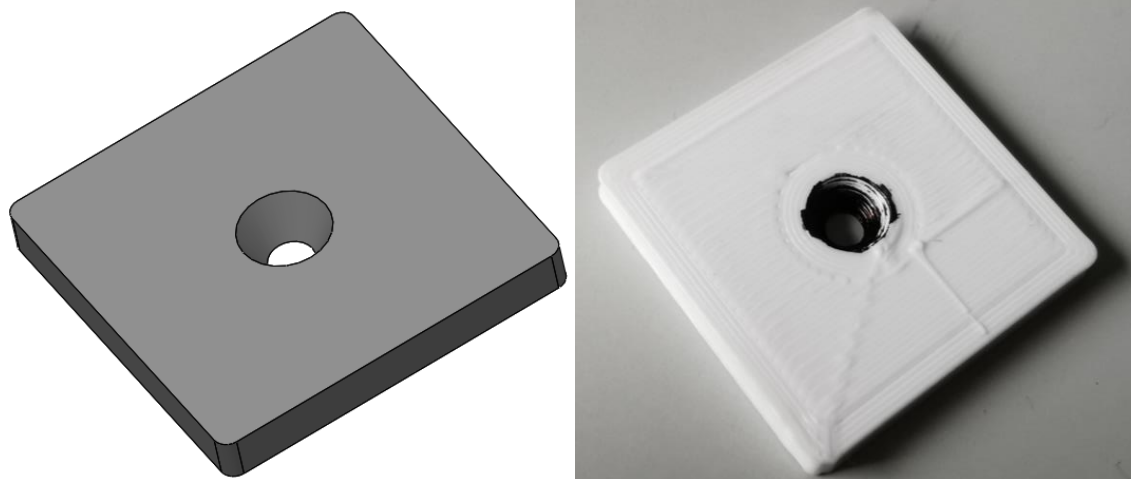


Figura 46 – Espaçador referente à marcação do ponto de soldadura, representação em Software Solidworks (a), e após impressão 3D, (b)

Na figura 47 é apresentada uma representação esquemática do posicionamento do ponto de soldadura e da sobreposição das chapas.

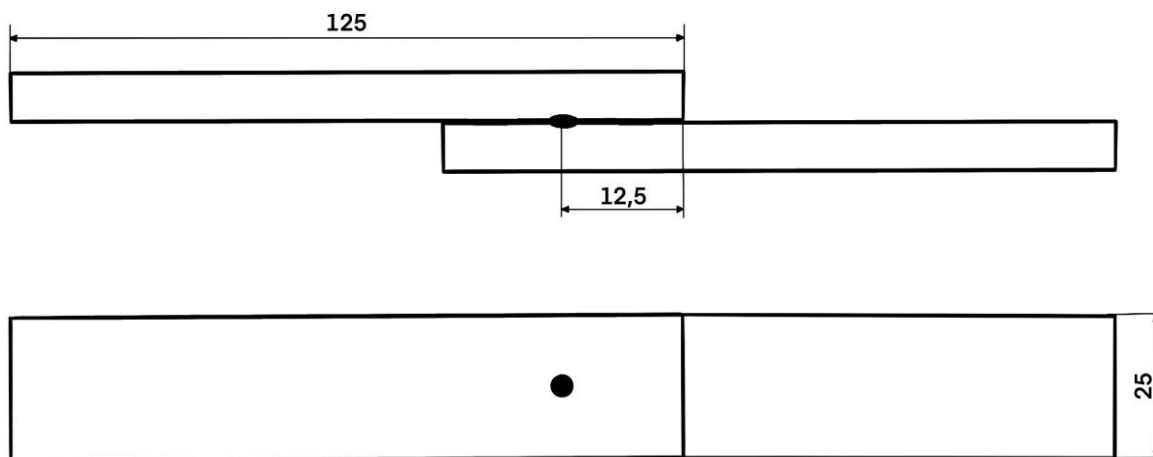


Figura 47 – Representação esquemática da realização da soldadura das chapas com um ponto de soldadura

As marcações nas chapas foram realizadas conforme presente na figura 48, sendo numa das chapas marcada a posição do ponto de soldadura e na outra a linha de espaçamento de 25 mm para correto posicionamento da chapa inferior. Uma vez que as soldaduras se realizaram de forma manual, é

possível a ocorrência de pequenos desvios entre as chapas e no posicionamento do ponto de soldadura, não sendo estes considerados para o estudo.



Figura 48 – Marcações realizadas nos provetes pré-soldadura com recurso ao espaçador fabricado

3.3. Soldadura

A realização das soldaduras teve por base um estudo realizado sobre os melhores parâmetros aplicáveis mediante as espessuras pretendidas e o equipamento à disposição, sendo assim estas realizadas no equipamento CEA NKLT 28. Nas figura 49 apresenta-se o equipamento de soldadura em utilização para os diferentes materiais. O Anexo A apresenta os dados técnicos do equipamento.



Figura 49 – Equipamento de soldadura CEA NKLT 28 em utilização para a soldadura dos provetes em aço

O conhecimento dos equipamentos e das espessuras de chapa em utilização permitiu a realização de um estudo sobre os melhores parâmetros, a utilizar para a realização das diferentes combinações de parâmetros aplicáveis no Método de Taguchi.

Seguidamente são apresentados os parâmetros selecionados, as combinações dos mesmos com base no método de Taguchi, e as etapas de preparação dos equipamentos para a realização das soldaduras, separando-se pelos dois materiais escolhidos.

3.3.1. Aço

A escolha do equipamento, permitiu, através do manual de utilização, determinar os parâmetros mais adequados definidos pelo fabricante para as espessuras em estudo, tendo-se optado pela utilização dos valores mais conservativos, ou seja, mais reduzida intensidade de corrente e de tempo de soldadura. Na tabela 8 encontram-se apresentados os valores do fabricante para as diferentes espessuras de aço a soldar. No Anexo B é possível observar os restantes valores definidos pelo fabricante para a soldadura de outras espessuras em aço.

Tabela 8 – Parâmetros ótimos definidos pelo fabricante para a soldadura em aço

Espessura (mm)	Tempo de soldadura (ciclos)	Força do elétrodo (daN)	Corrente de Soldadura (A)	Diâmetro do elétrodo (mm)
1	9	227	9200	5,8
1,5	12	362	11600	6.9
2,0	18	496	13300	7.9

Na tabela 9 apresentam-se os parâmetros em uso para a realização do método de Taguchi nos provetes de aço. Em congruência com estes parâmetros procedeu-se à utilização de 3 parâmetros fixos, sendo estes o tempo de aperto de 10 ciclos, o tempo de subida de corrente de 6 ciclos, e a força de aperto de 155 daN. Os elétrodos utilizados apresentam um diâmetro de 6 mm. Para a correta análise de cada combinação de parâmetros foram realizados 3 provetes por combinação, considerando-se os resultados finais como uma média desses mesmos 3 provetes. A numeração dos diferentes provetes resultou de uma combinação entre o número de Taguchi, de 1 a 9, e as letras A, B e C representando os 3 provetes em análise.

Tabela 9 – Combinação de parâmetros em utilização para a realização do método de Taguchi nos provetes em aço St12

Número da combinação	Espessura de chapa (mm)	Intensidade de Corrente (A / % de corrente)	Tempo de soldadura (ciclos)
1	<i>1,0</i>	<i>9100 / 65</i>	<i>9</i>
2	<i>1,0</i>	<i>11620 / 83</i>	<i>12</i>
3	<i>1,0</i>	<i>13300 / 95</i>	<i>18</i>
4	<i>1,5</i>	<i>9100 / 65</i>	<i>12</i>
5	<i>1,5</i>	<i>11620 / 83</i>	<i>18</i>
6	<i>1,5</i>	<i>13300 / 95</i>	<i>9</i>
7	<i>2,0</i>	<i>9100 / 65</i>	<i>18</i>
8	<i>2,0</i>	<i>11620 / 83</i>	<i>9</i>
9	<i>2,0</i>	<i>13300 / 95</i>	<i>12</i>

Determinados os parâmetros em utilização deu-se início à realização das soldaduras, sendo necessário proceder à preparação dos elétrodos através da liagem dos mesmos. Este processo, tal como apresentado na figura 50, permite a remoção de material externo fundido nas faces dos elétrodos e, em simultâneo, promover o paralelismo entre as faces dos dois elétrodos e o material a soldar.



Figura 50 – Limagem dos elétrodos no equipamento de soldadura CEA NKLT 28

Posteriormente, e com recursos a uma escova de aço, realizou-se manualmente a remoção dos resíduos resultantes da passagem da lima, tal como presente na figura 51. Estes processos podem ser realizados entre soldaduras quando ocorre ligação das chapas aos elétrodos.



Figura 51 – Passagem da escova de aço nos elétrodos do equipamento de soldadura CEA NKLT 28

3.3.2. Alumínio

A realização das soldaduras nos provetes de alumínio teve por base um estudo complementar em diferentes equipamentos de soldadura por pontos. Este estudo permitiu, tal como referido no estado da arte, determinar que, para a correta realização de soldaduras em alumínio, é necessário um equipamento de soldadura com uma gama de intensidade de corrente entre 30 e 40 kA. Uma vez que a aquisição de um equipamento com esta gama se tornou inexecutável, realizou-se um estudo diferenciado do previamente descrito para os provetes de aço.

A soldadura de alumínio torna-se mais complexa que outros materiais pois este apresenta uma condutividade térmica muito elevada, sendo assim importante conseguir obter a focalização do aquecimento na zona que se pretende soldar. O estudo neste material foi assim realizado com base num pré-aquecimento das chapas e posterior realização da soldadura de forma imediata. Este aquecimento permite diminuir o gradiente térmico entre o ponto de aquecimento em contacto com os elétrodos e o restante material de base das chapas.

A tabela 10 apresenta assim os parâmetros em utilização para a realização do Método de Taguchi neste material, sendo os parâmetros em estudo: a temperatura de pré-aquecimento, a corrente de soldadura e o tempo de soldadura. Como o estudo em questão não se encontra documentado em outros estudos científicos, a escolha dos parâmetros de corrente de soldadura e tempo de soldadura foi realizado com base nos parâmetros em uso na soldadura dos provetes em aço podendo não ser os mais adequados para a aplicação neste material.

Tabela 10 – Combinação de parâmetros em utilização para a realização do método de Taguchi nos provetes em alumínio 1050

Número da combinação	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Intensidade de Corrente (A / % de corrente)	Tempo de soldadura (ciclos)
1	70,0	9100 / 65	9
2	70,0	11620 / 83	12
3	70,0	13300 / 95	18
4	90,0	9100 / 65	12
5	90,0	11620 / 83	18
6	90,0	13300 / 95	9
7	110,0	9100 / 65	18
8	110,0	11620 / 83	9
9	110,0	13300 / 95	12

Em congruência com estes parâmetros procedeu-se à utilização de 3 parâmetros fixos, sendo estes semelhantes aos valores em utilização para os provetes de aço, o tempo de aperto de 10 ciclos, o tempo de subida de corrente de 6 ciclos e a força de aperto de 155 daN. Os elétrodos utilizados apresentam um diâmetro de 6 mm. Também neste material foram efetuados 3 provetes por cada combinação de parâmetros.

Determinados os parâmetros em estudo, a realização das soldaduras seguiu o procedimento tal como previamente descrito, sendo a única variação a aplicação do pré-aquecimento. Este foi realizado num forno DeLonghi, figura 52, sendo os provetes retirados um a um e imediatamente soldados, reduzindo assim a perda de temperatura nos mesmos.



Figura 52 – Forno em utilização para a realização do pré-aquecimento dos provetes de alumínio 1050

3.4. Ensaios e Medições

Tal como previamente referido, e de forma a obter uma correta análise das soldaduras, realizaram-se ensaios de corte e medições de microdureza. A realização destes encontra-se descrita nos subcapítulos seguintes.

3.4.1. Ensaios de Corte

Para evitar o efeito de desalinhamento da força de carregamento relativamente ao plano da junta, recorreu-se ao uso de espaçadores com a espessura do material em estudo, sendo estes colocados de acordo com a figura 53. Após esta operação, os provetes foram ensaiados ao corte com recurso ao equipamento SHIMADZU – autograph AG-X (100 kN), conforme representado na figura 54.



Figura 53 – Colocação de espaçadores para a realização dos ensaios de corte em provetes fabricados por soldadura por pontos

No ensaio foi considerada uma distância entre amarras de 140 mm e uma velocidade de ensaio constante de 5 mm/min.



Figura 54 – Realização de um ensaio de corte a provetes fabricados por soldadura por pontos

Após ensaio, efetuou-se a medição interna do ponto de soldadura para, desta forma, ser realizado o cálculo da tensão de corte, de acordo com (1).

$$\sigma = F/A \quad (2)$$

Apesar de se terem realizado os cálculos dos valores de tensão nestes ensaios, uma vez que as medições da secção se realizam de forma manual e são medidas posteriormente à rotura, estes valores podem apresentar discrepâncias e desta forma provocar erros posteriores nos cálculos de tensão de corte. Desta forma, e tendo em conta o modo de rotura ocorrida nos provetes (nos provetes em que não ocorre rotura da interface, mas sim por “pullout”, as tensões aplicadas não se apresentam apenas como corte, mas sim como junção de vários esforços, tração, corte e arrancamento) foi adotada a força como variável de comparação para as diferentes combinações de parâmetros.

Através destes ensaios é possível obter um gráfico Força/Deslocamento, tal como o exemplo apresentado na figura 55. Para este estudo foi considerada a utilização do deslocamento na medida em que a deformação ocorre em todo o provete e não apenas na zona de sobreposição. O deslocamento permite assim identificar de forma mais correta o que ocorre nos provetes aquando da realização do ensaio de corte.

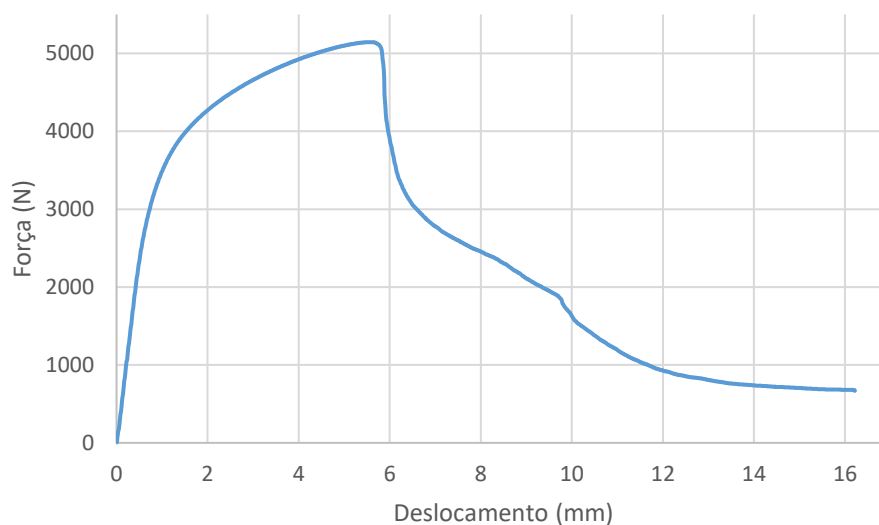


Figura 55 – Gráfico Força/Deslocamento típico proveniente de um ensaio de corte

3.4.2. Medições de Dureza

O estudo da microdureza das amostras na zona central do ponto de soldadura foi realizado inicialmente com o corte das amostras nessa mesma zona e posterior embebimento em resina, tal como apresentado na figura 56.



Figura 56 – Amostras embebidas em resina para posterior medição da microdureza

Após este processo as amostras foram sujeitas a 5 etapas de lixagem com diferentes granulometrias: 220, 500, 1200, 3 μm e por fim 5 μm . Previamente às medições das microdureza, as amostras foram sujeitas a um ataque químico na superfície a medir para contrastar as zonas do ponto de soldadura e as transições para o material base.

As medições de microdureza realizaram-se no equipamento Struers Duramin presente na figura 57.



Figura 57 – Equipamento de medição das microdureza – Struers Duramin

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos diferentes materiais, assim como a aplicação do Método de Taguchi. Por fim foi realizada uma discussão de todos os resultados obtidos.

De forma a simplificar a leitura dos resultados e gráficos obtidos ao longo de todos os ensaios, apenas serão apresentados, ao longo deste capítulo, gráficos e tabelas resumos que permitem visualizar os resultados e obter as conclusões mais relevantes. Posteriormente, e em anexo, apresentam-se todos os resultados obtidos, encontrando-se estes separados pelos diferentes materiais, ensaios e combinações de parâmetros.

4.1. Aço

4.1.1. Resultados

O conjunto de medições efetuadas aos diâmetros do ponto de soldadura após a realização dos ensaios e o registo dos valores obtidos estão sumariados na tabela 11.

O estudo das medições efetuadas permite observar o aparecimento de valores consistentes para os diferentes provetes realizados com as mesmas combinações de parâmetros, permitindo uma comparação entre os valores médios obtidos para as diferentes combinações. Desta forma, ao longo das diferentes espessuras de provetes, observa-se o aparecimento de valores de secção muito díspares, sendo estes demonstrativos das variações de temperatura provocadas pelos diferentes parâmetros em utilização.

Tabela 11 – Medições dos diâmetros dos pontos de soldadura após a realização dos ensaios de corte aos provetes de aço St12

Número da combinação	Amostra	Diâmetro do ponto após rotura (mm)		Valor Médio (mm)	Área do ponto de soldadura (mm ²)
		1	2		
1	A	5,51	5,83	5,670	25,250
	B	5,95	5,82	5,885	27,201
	C	5,78	5,62	5,700	25,518
2	A	7,47	7,57	7,520	44,415
	B	7,15	7,81	7,48	43,943
	C	7,51	7,66	7,585	45,186
3	A	8,72	9,14	8,930	62,631
	B	8,44	8,48	8,460	56,212
	C	8,98	8,81	8,895	62,142
4	A	5,92	6,15	6,035	28,605
	B	5,78	6,32	6,050	28,748
	C	6,01	6,16	6,085	29,081
5	A	7,42	8,28	7,850	48,398
	B	7,87	8,25	8,060	51,022
	C	8,13	8,62	8,375	55,088
6	A	6,75	6,83	6,790	36,210
	B	7,34	7,17	7,255	41,339
	C	7,11	6,69	6,900	37,393
7	A	7,12	7,53	7,325	42,141
	B	7,56	7,63	7,595	45,305
	C	6,81	7,04	6,925	37,664
8	A	5,68	5,75	5,715	25,652
	B	5,81	5,92	5,865	27,016
	C	5,63	5,55	5,590	24,542
9	A	7,17	7,24	7,205	40,772
	B	7,11	7,18	7,145	40,095
	C	7,54	7,46	7,500	44,179

Posteriormente à medição da secção nos diferentes provetes iniciou-se o estudo dos resultados obtidos, sendo estes apresentados de forma separada por espessura de material, permitindo facilitar a leitura e a interpretação dos mesmos. No apêndice C é possível observar todos os gráficos obtidos para as diferentes combinações de parâmetros.

- **1,0 mm**

Os provetes de aço com espessura de 1,0 mm englobam as combinações do Método de Taguchi numeradas com 1, 2 e 3, sendo, assim, apresentados na tabela 12 os valores médios resultantes e o desvio padrão para os 3 provetes realizados dentro da mesma combinação de parâmetros.

Tabela 12 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 1 mm de espessura

Número da combinação	Secção Média (mm²)	Desvio Padrão - Secção Média (mm²)	Força Máxima média (N)	Desvio Padrão – Força Máxima média (N)
1	25,99	0,864	5039,56	75,58
2	44,52	0,512	6151,75	153,65
3	60,33	2,918	6724,70	264,99

Os valores obtidos permitem identificar a existência de variações muito pronunciadas nos valores médios, tanto ao nível da secção média, como da força máxima aplicada, sendo notório que, os provetes que apresentam valores de secção superiores apresentam maiores valores de força máxima.

Uma vez que os parâmetros na combinação 1, e devido aos arranjos de Taguchi, são os mais adequados indicados pelo fabricante para esta espessura, o valor de força máxima nestes apresenta-se muito superior quando comparado com os restantes. Apesar disto, os valores de força são, nesta combinação, muito inferiores aos restantes, sendo assim em termos práticos benéfica a utilização da combinação de parâmetros 3.

No cálculo dos desvios padrão é notório o aparecimento de valores elevados nas combinações de parâmetros 2 e 3, sendo este valor substancial no caso da combinação 3, apresentando-se como 265.

A figura 58 apresenta um gráfico Força/Deslocamento comparativo de um provete proveniente de cada uma das combinações de Taguchi previamente referidas. A escolha do provete em apresentação para cada combinação teve por base o valor de força máxima mais elevada.

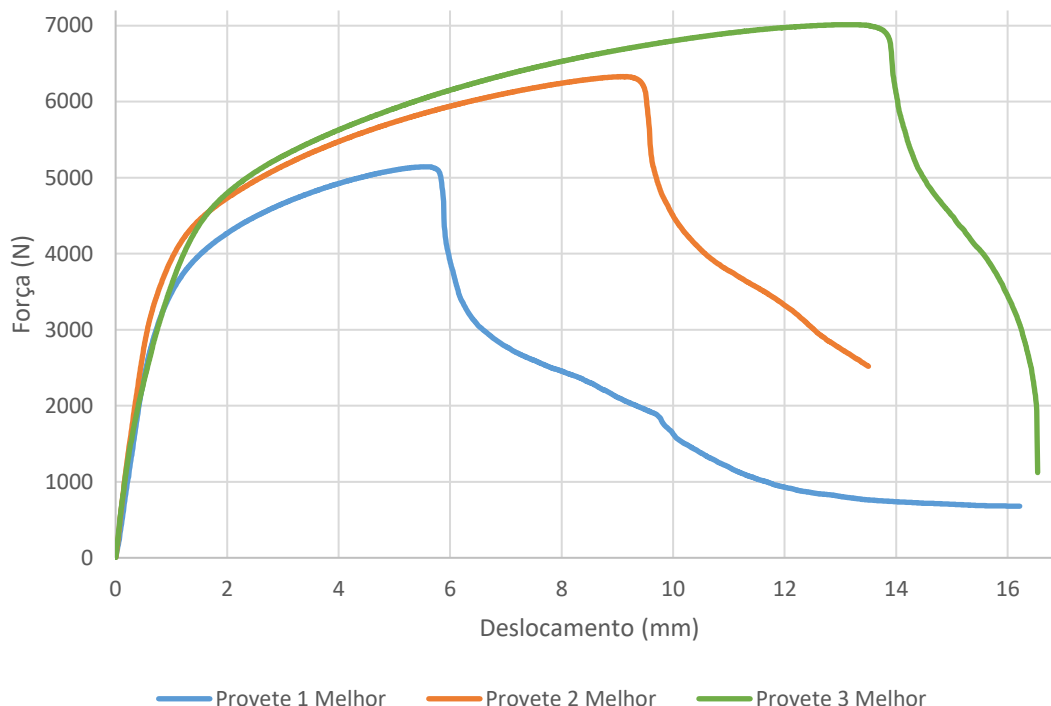


Figura 58 – Comparação para os provetes de 1,0 mm de aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

O gráfico de Força/Deslocamento permite identificar as variações provenientes do aumento da força aplicada ao longo das diferentes combinações, sendo que, o aumento da força promove um aumento muito acentuado da ductilidade dos provetes e desta forma, da extensão dos mesmos no ponto de rotura.

Aquando dos ensaios foi também notório que, no momento de rotura, em todos os provetes ensaiados nas três primeiras combinações do método de Taguchi, não ocorre rotura na interface do ponto, mas sim por arrancamento do ponto juntamente com o material de base. Este modo de rotura, tal como apresentado na figura 59, permite a continuação do ensaio tal como se observa no gráfico, em contrapartida, as tensões convencionais diminuem de forma acentuada, uma vez que ocorre uma redução abrupta da área em tensão e para o cálculo destas a redução da secção no momento de rotura não se encontra contabilizada.

Os ensaios foram finalizados sem a ocorrência do arranque completo do ponto, uma vez que, a força máxima aplicada, valor pretendido para este estudo, já era possível de calcular.



Figura 59 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 1A fabricado em aço St12

- **1,5 mm**

As espessuras de 1,5 mm para os provetes em aço representam as combinações numeradas 4, 5 e 6 do Método de Taguchi, sendo os resultados destas combinações apresentados na tabela 13.

Tabela 13 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 1,5 mm de espessura

Número da combinação	Secção Média (mm²)	Desvio Padrão - Secção Média (mm²)	Força Máxima média (N)	Desvio Padrão – Força Máxima média (N)
4	28,81	0,244	7417,98	94,15
5	51,50	3,371	9270,75	46,95
6	38,31	2,686	7979,64	201,02

Os valores obtidos para os provetes desta espessura, da mesma forma que nos provetes de 1,0 mm, apresentam variações de força máxima média muito elevadas, neste caso aproximadamente 1850 N. Nestes ensaios os valores de secção superiores apresentam valores de força máxima mais elevados, sendo que todas as combinações apresentam valores de força superiores às anteriormente apresentadas.

De salientar que, a combinação numerada 4, apresenta o valor de força elevado e, em simultâneo, o valor de desvio padrão mais reduzido.

Tal como nos provetes com 1,0 mm de espessura, na figura 60 é possível observar o gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes de 1,5 mm que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros.

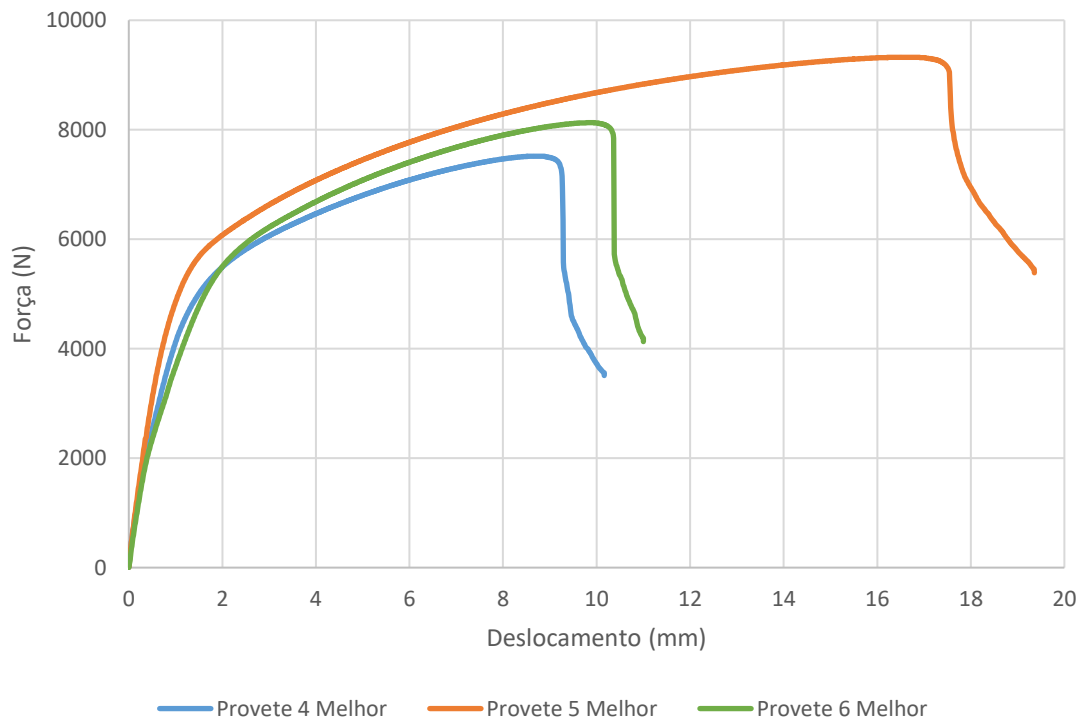


Figura 60 – Comparação para os provetes de 1,5 mm de Aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

Os parâmetros em estudo para a espessura de 1,5 mm permitiram identificar o aparecimento de variações acentuadas no gráfico Força/Deslocamento, nomeadamente no provete 5 que apresenta uma força máxima superior conciliada com um aumento acentuado do deslocamento no mesmo.

Nestes ensaios ocorreu rotura por arrancamento em todos os provetes, apresentando os gráficos esta redução acentuada após rotura, tal como previamente referido. Na figura 61 apresenta-se uma imagem do provete 5A onde se observa o arranque do ponto de soldadura e a expulsão interna de material que ocorre proveniente das elevadas temperaturas da soldadura.

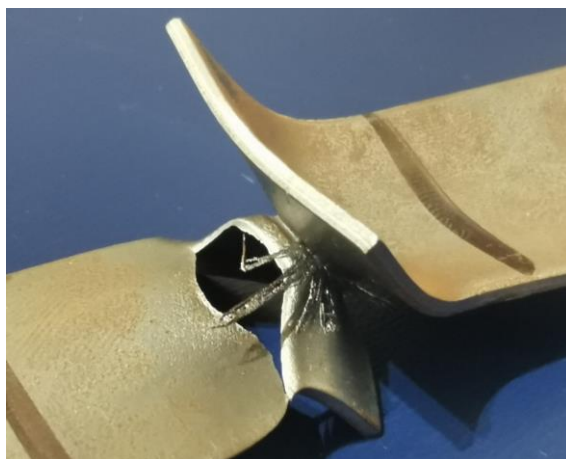


Figura 61 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 5A fabricado em aço St12

- **2,0 mm**

As combinações finais do Método de Taguchi, 7, 8 e 9, representam os provetes com espessura de 2,0 mm, apresentando-se estes resultados na tabela 14.

Tabela 14 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de aço St12 de 2,0 mm de espessura

Número da combinação	Secção Média (mm²)	Desvio Padrão - Secção Média (mm²)	Força Máxima média (N)	Desvio Padrão – Força Máxima média (N)
7	41,70	3,839	11261,92	232,40
8	25,74	1,239	9068,31	232,35
9	41,68	2,189	11713,25	108,03

Os valores provenientes destas combinações demonstram o aparecimento de secções e forças de rotura muito próximas para os números 7 e 9. A combinação numerada 8 apresenta uma secção muito reduzida e, consequentemente, uma força máxima muito inferior a ambas as outras e, também, inferior à combinação 5 previamente referida.

A figura 62 representa o gráfico Força/Deslocamento comparador das diferentes combinações de parâmetros para os provetes de 2,0 mm de espessura de aço.

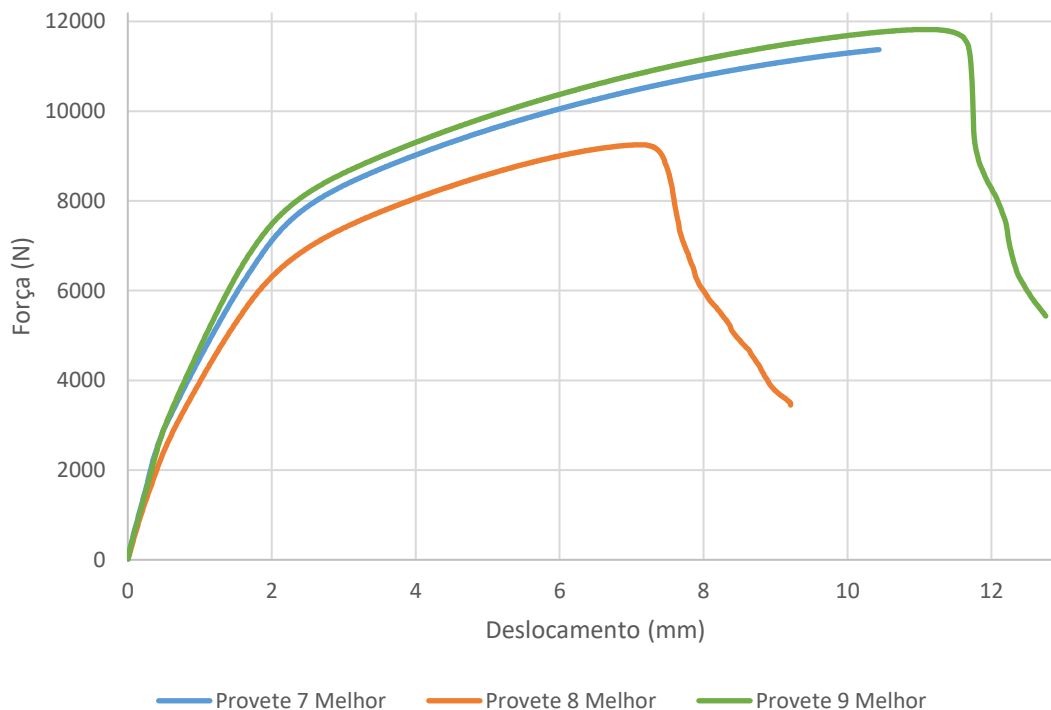


Figura 62 – Comparação para os provetes de 2,0 mm de Aço St12 com maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

No gráfico observa-se a aproximação das linhas do ensaio nos provetes 7 e 9, tal como demonstrado pelos valores de força, e uma redução acentuada no provete 8 do deslocamento verificado.

Ao contrário dos restantes ensaios, no provete 7C ocorreu a rotura na interface do ponto, sendo esta visível na figura 63. Na figura 64 é possível observar a comparação dos diferentes provetes, A, B e C com base nos parâmetros da combinação 7 do método de Taguchi.



Figura 63 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 7C fabricado em aço St12

A ocorrência de uma rotura na interface permitiu a observação completa da zona interna do ponto de soldadura, onde é notória a existência de expulsão de material apenas numa direção. Este fenómeno é visível noutras soldaduras realizadas e pode ter por base um desalinhamento nos eletrodos de soldadura devido à passagem da lixa previamente à soldadura.

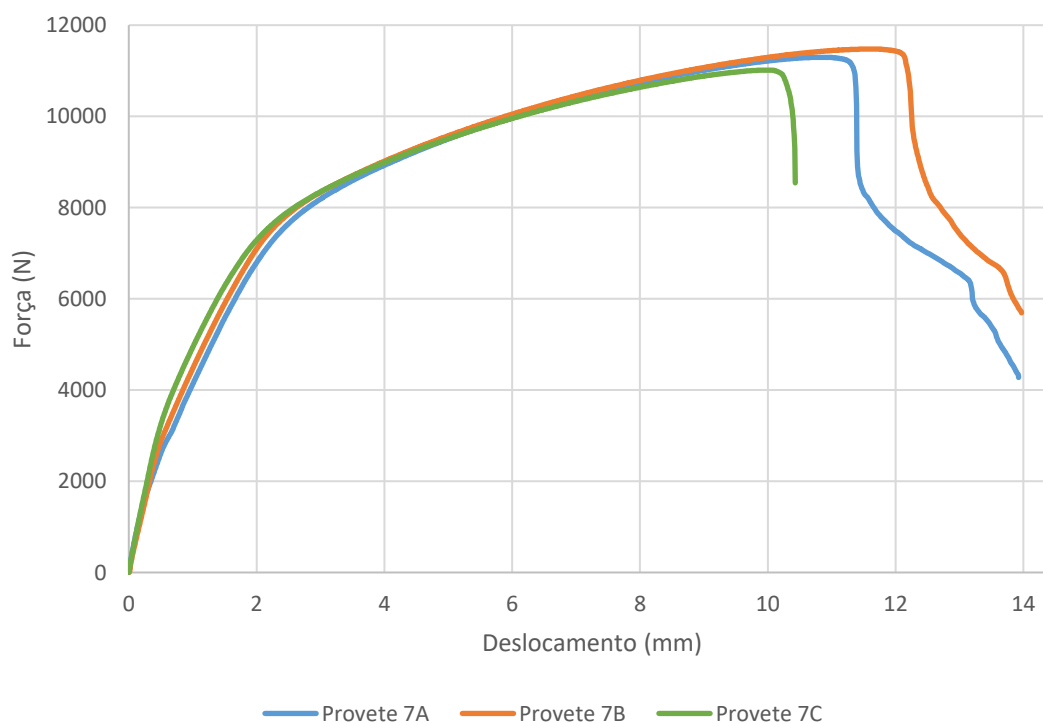


Figura 64 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, B e C fabricados em aço St12 com base na combinação de parâmetros número 7 do Método de Taguchi

A observação do gráfico dos diferentes provetes não permite identificar variações acentuadas que expliquem a variação aquando do modo de rotura do provete, sendo a maior variação relativa à secção do ponto, uma vez que no provete 7C ocorre uma redução da mesma, tabela 11.

- **Comparação geral**

Finalizando a análise dos ensaios aos provetes de aço, realizou-se um gráfico Força/Deslocamento onde se apresenta uma combinação de um provete para cada combinação determinada pelo Método de Taguchi, tal como se observa na figura 65. Este gráfico permite observar como o comportamento varia de forma muito acentuada mediante os parâmetros de soldadura em utilização.

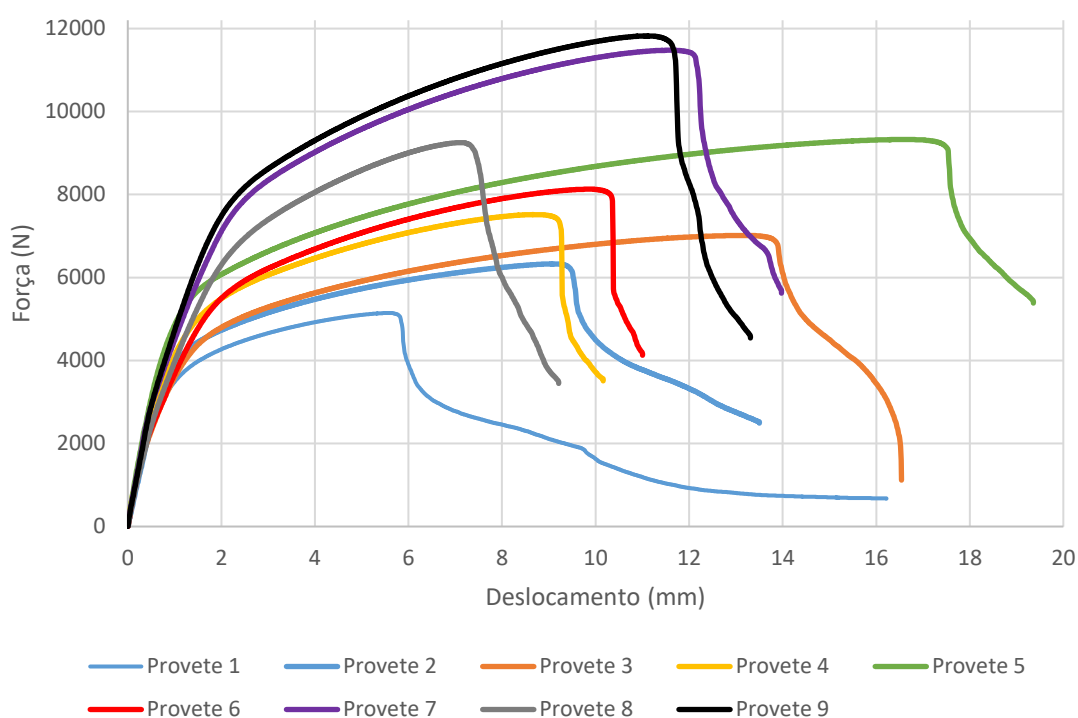


Figura 65 – Gráfico Força/Deslocamento comparador das diferentes combinações de parâmetros definidas para a soldadura dos provetes de aço St12 com base no Método de Taguchi

4.1.2. Método de Taguchi

Com base nos resultados de força máxima obtidos, foi possível iniciar o estudo dos parâmetros ótimos através do Método de Taguchi, sendo este realizado com os valores presentes na tabela 9 e 15.

Tabela 15 – Valores de força máxima (N) referentes ao Método de Taguchi para os provetes em aço St12

Número da combinação	Força Máxima (N)
1	5039,56
2	6151,75
3	6724,70
4	7417,98
5	9270,75
6	7979,64
7	11261,92
8	9068,31
9	11713,25

Para a aplicação do Método de Taguchi recorreu-se ao software Minitab, onde se selecionou a opção de “*Larger is Better*” para a análise dos valores de “*Signal-to-Noise Ratio*” uma vez que se pretende obter a melhor combinação de parâmetros para o maior valor possível de força máxima. O software determinou a utilização de níveis para os diferentes parâmetros, sendo estes apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Níveis em utilização para os diferentes parâmetros de soldadura dos provetes de aço St12 com base no software Minitab

Nível	Espessura	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	1,0	0,65	9
2	1,5	0,83	12
3	2,0	0,95	18

Esta análise permitiu obter a tabela 17 onde se apresentam os valores de resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” para os diferentes níveis e parâmetros em estudo.

Tabela 17 – Tabela de resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12

Nível	Espessura	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	75,46	77,50	77,08
2	78,26	78,09	78,19
3	80,52	78,66	78,98
Delta	5,06	1,16	1,90
Importância	1	3	2

Os resultados obtidos permitem identificar uma variação muito acentuada de valores do delta para os diferentes parâmetros em utilização, sendo neste caso a espessura muito mais influente nos resultados da força máxima aquando da sua comparação com os parâmetros de corrente e tempo de soldadura. Este aumento significativo apresenta-se como expectável na medida em que o estudo se baseia em espessuras bastante reduzidas e produzindo assim efeitos mais notórios.

Os parâmetros de corrente e tempo de soldadura apresentam uma relevância muito próxima entre si podendo este fator ser explicado pela utilização de valores não muito díspares ao longo dos diferentes níveis e dado que ambos os fatores influenciam na sua maioria a dimensão final interna do ponto de soldadura.

A figura 66 apresenta graficamente os valores obtidos na tabela 17.

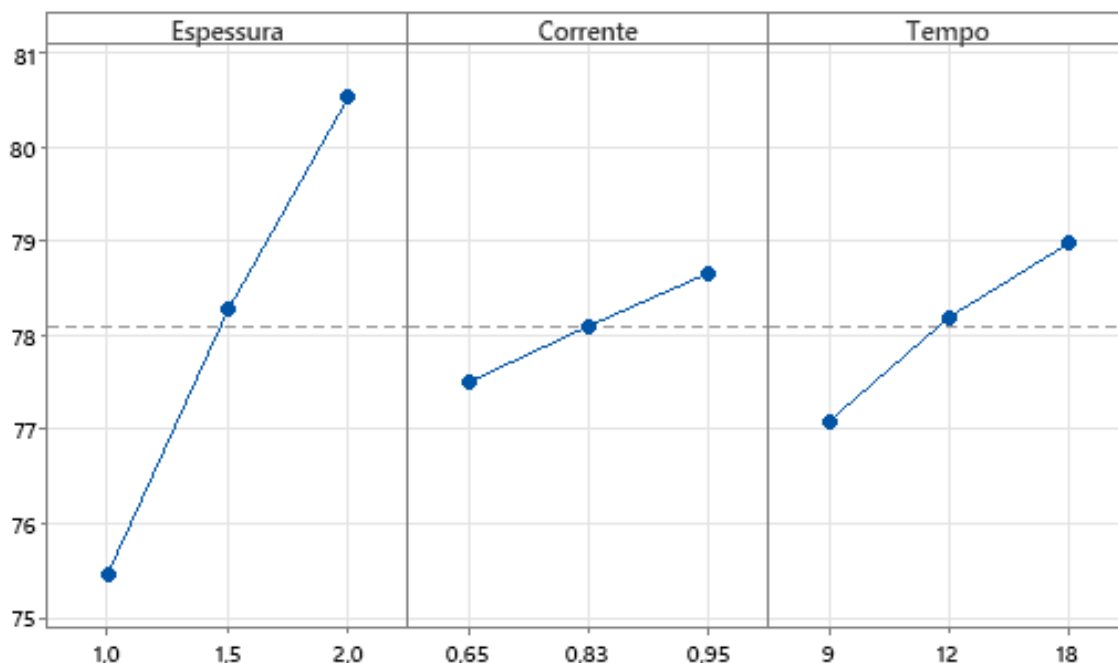


Figura 66 – Representação gráfica da resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12

Estes resultados de importância foram também comprovados com os valores de médias obtidos do software. Na tabela 18 é possível visualizar estes resultados e na figura 67 a sua representação gráfica.

Tabela 18 – Tabela de resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12

Nível	Espessura	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	5972	7906	7363
2	8223	8164	8428
3	10681	8806	9086
Delta	4709	899	1723
Importância	1	3	2

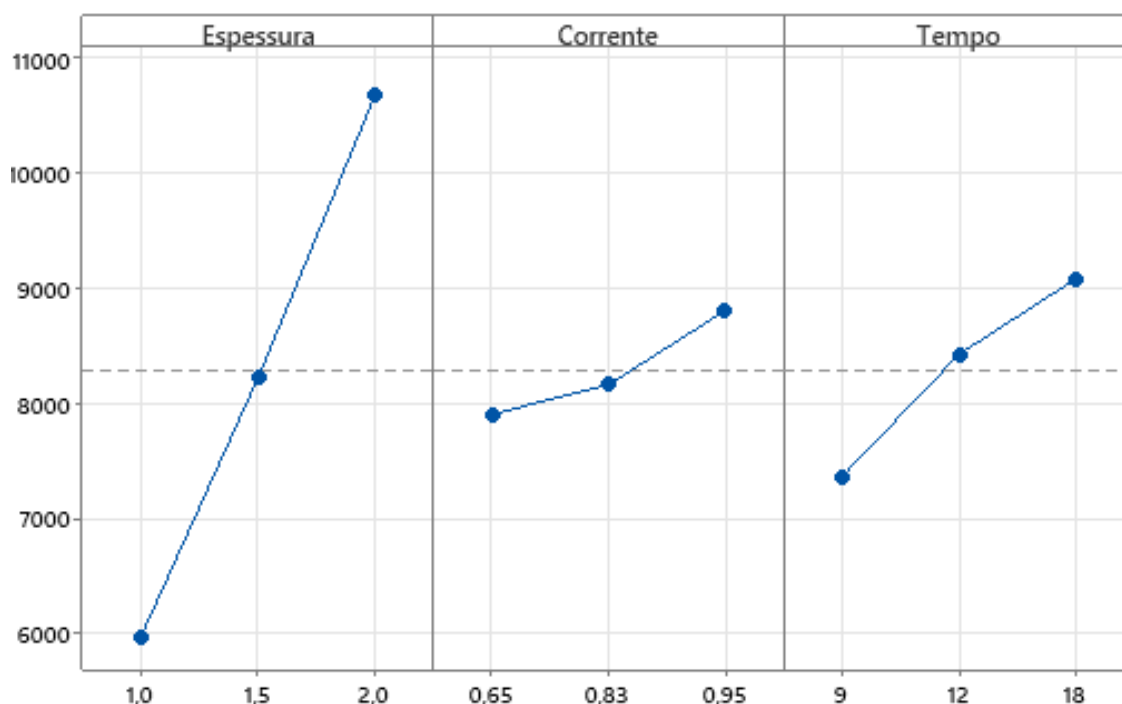


Figura 67 – Representação gráfica da resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em aço St12

Os resultados obtidos foram posteriormente comparados através do valor p para, desta forma, permitir identificar quais os fatores em estudo que se apresentam estatisticamente significativos. Assim, e com recurso a um valor de segurança de alfa igual a 5%, este foi comparado com os valores presentes na tabela 19. O valor de alfa representa um valor de segurança, ou seja, a percentagem de risco de assumir um fator como estatisticamente significativo, não o sendo este.

Tabela 19 – Resultados de valor de p referentes à aplicação do Método de Taguchi para os provetes de aço St12

Fator	Valor de p
Espessura	0,017
Intensidade de corrente	0,133
Tempo de soldadura	0,080

Como é possível observar, a comparação do valor alfa de 0,05 com os valores p para os diferentes fatores, demonstra a existência de apenas um parâmetro estatisticamente significativo, a espessura do material. A intensidade de corrente e o tempo de soldadura apresentam um valor p bastante superior ao valor de segurança, não podendo desta forma ser considerados como estatisticamente significativos. Estes resultados levaram à realização de mais uma combinação de parâmetros, sendo esta realizada com base nos valores obtidos pela aplicação do método de Taguchi. Esta combinação teve como objetivo tentar identificar um possível resultado de força máxima superior aos previamente obtidos. Na tabela 20 é possível observar a combinação de parâmetros referidas.

Tabela 20 – Parâmetros em utilização para a soldadura dos provetes finais em aço St12

Número da combinação	Espessura de chapa (mm)	Intensidade de Corrente (A / % de corrente)	Tempo de soldadura (ciclos)
10	2,0	13300 / 95	18

Os ensaios de corte realizados nestes provetes permitiram a obtenção dos gráficos Força/Deslocamento presente na figura 68 e os resultados de força máxima presentes na tabela 21. Os gráficos Força/Deslocamento individuais para os diferentes provetes encontram-se presentes no apêndice D.

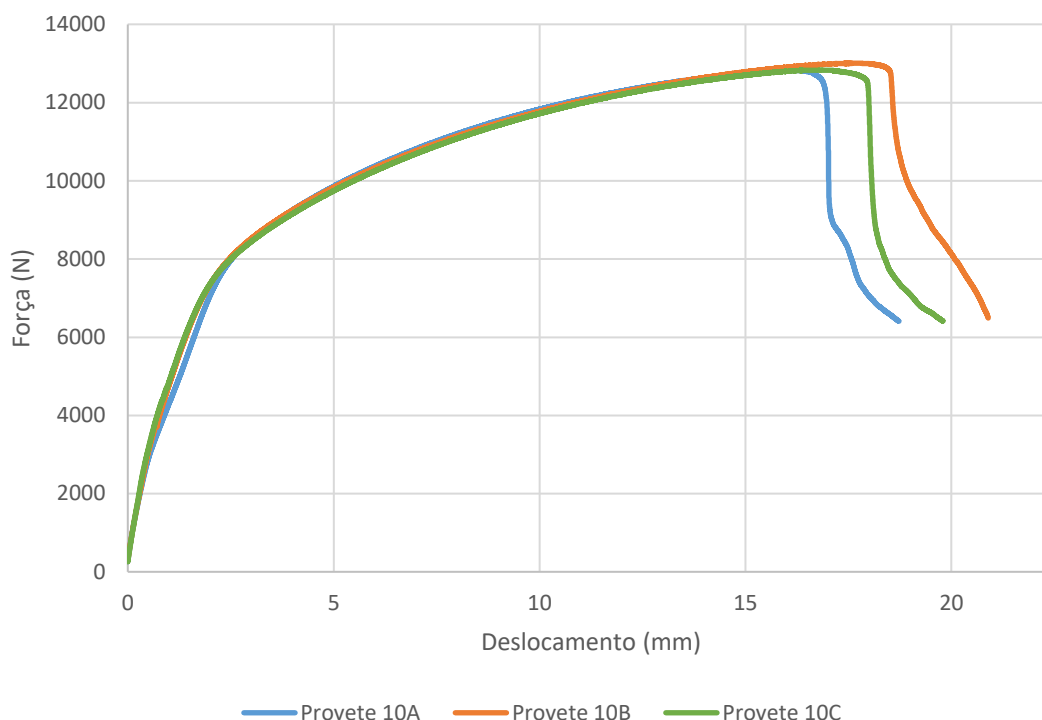


Figura 68 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, B e C fabricados em aço St12 com base na combinação de parâmetros número 10 do Método de Taguchi

Tabela 21 – Tabela resumo dos resultados obtidos para os provetes de aço St12 da combinação de parâmetros 10

Número da combinação	Secção Média (mm ²)	Força Máxima média (N)
10	39,65	12887,52

Os resultados obtidos nestes ensaios permitiram identificar uma rotura por arrancamento em todos os provetes analisados, sendo também observado um aumento significativo da força máxima aplicada nos provetes aquando da sua comparação com os resultados previamente apresentados.

A medição da dureza foi ainda realizada neste parâmetro tendo por base o método Vickers. Os resultados obtidos encontram-se presentes na figura 69, sendo ainda neste definidas as diferentes zonas presentes nos provetes, material de base, zona termicamente afetada e ponto de soldadura.

Como método comparador das durezas obtidas, foi realizado ainda um provete onde se aplicaram os valores opostos de tempo de soldadura e corrente de soldadura, ou seja, 0,65 e 9 ciclos. Nestes provetes ocorreu a rotura na interface e obteve-se um valor de força máxima muito inferior de 2849,75 N. Estes provetes foram denominados como combinação de parâmetros 11.

As variações obtidas nestas duas combinações aquando do estudo das forças máximas aplicadas podem ser resultado da diminuição da dureza máxima obtida na zona central do “nugget”, uma vez que, na combinação de parâmetros 10 este valor é bastante mais elevado.

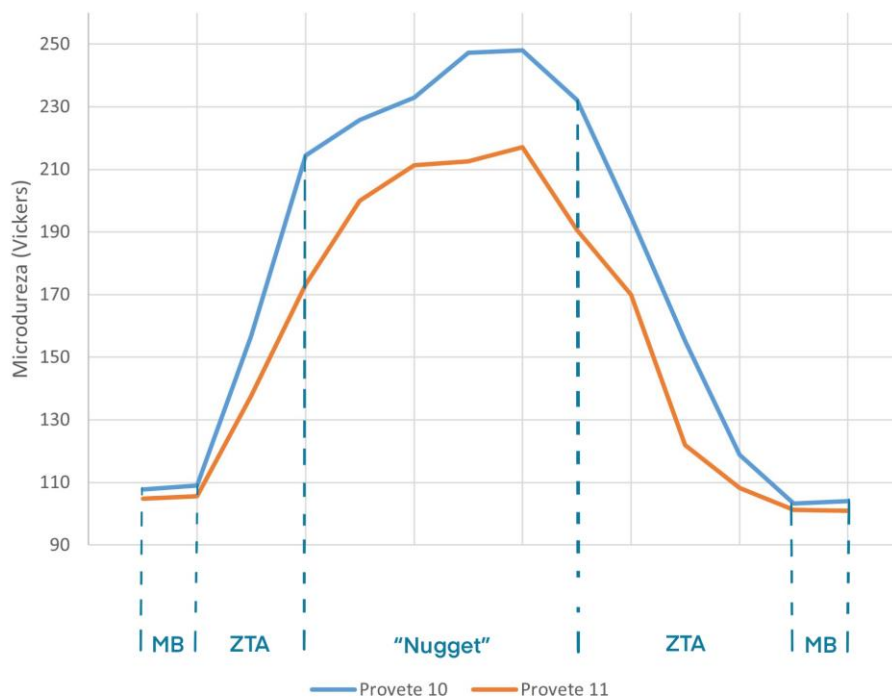


Figura 69 – Comparação das durezas medidas pelo método de Vickers nos provetes realizados com base nas combinações de parâmetros 10 e 11

Em ambos os provetes foi ainda realizada uma ampliação de 12x na zona central do ponto, conforme ilustra a figura 70. Esta figura permite observar a existência de um defeito no provete 10 e um ponto de soldadura com uma área muito reduzida no provete 11.

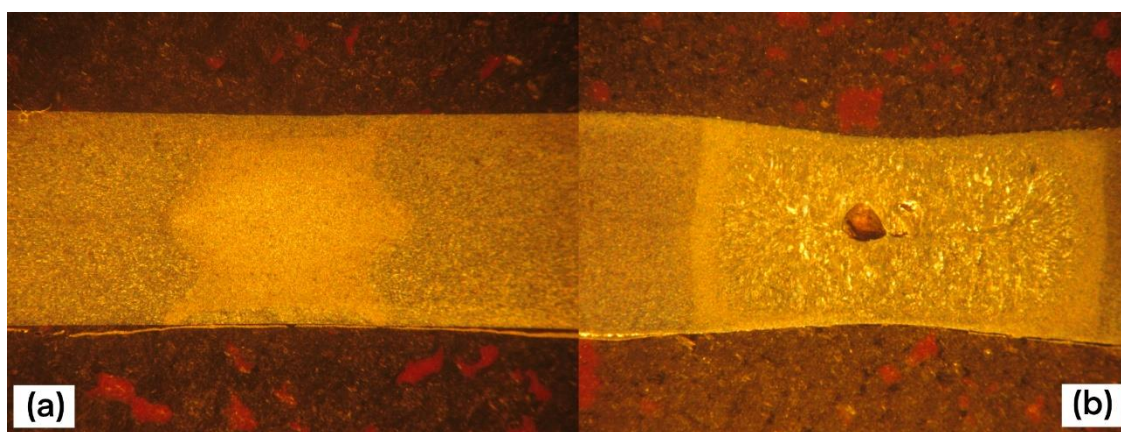


Figura 70 – Fotografias macroscópicas com ampliação 12x para a combinação de parâmetros 11 (a) e 10 (b)

4.2. Alumínio

4.2.1. Resultados

Em seguimento aos resultados do aço, também para o estudo dos ensaios realizados nos provetes de alumínio apresenta-se a tabela 22 referente ao conjunto de medições realizadas posteriormente à rotura dos provetes nos pontos de soldadura.

O estudo das medições efetuadas permite observar o aparecimento de valores consistentes para os diferentes provetes realizados com as mesmas combinações de parâmetros, permitindo uma comparação entre os valores médios obtidos para as diferentes combinações. Ao contrário dos valores observados nos provetes de aço, neste material as secções obtidas apresentam-se muito menores e mais próximas entre as diferentes combinações de parâmetros do que anteriormente observado.

Esta redução acentuada da secção é demonstrativo da dificuldade em obter um ponto de soldadura de dimensão significativa aquando da soldadura de componentes em ligas de alumínio.

Tabela 22 – Medições dos diâmetros dos pontos de soldadura após a realização dos ensaios de corte aos provetes de alumínio 1050

Número da combinação	Amostra	Diâmetro do ponto após rotura (mm)		Valor Médio (mm)	Área do ponto de soldadura (mm ²)
		1	2		
1	A	3,33	2,32	2,825	6,268
	B	3,19	2,54	2,865	6,447
	C	2,72	2,42	2,570	5,187
2	A	3,44	4,18	3,810	11,401
	B	3,28	3,97	3,625	10,321
	C	3,63	2,71	3,170	7,892
3	A	4,85	3,60	4,225	14,020
	B	4,94	3,33	4,135	13,429
	C	4,42	3,11	3,765	11,133
4	A	2,20	2,40	2,300	4,155
	B	2,87	1,90	2,385	4,468
	C	3,17	2,18	2,675	5,620
5	A	4,37	3,95	4,160	13,592
	B	3,57	3,36	3,465	9,430
	C	4,01	2,55	3,280	8,450
6	A	3,92	2,85	3,385	8,999
	B	3,99	3,49	3,740	10,986
	C	3,57	2,43	3,000	7,069
7	A	3,31	1,90	2,605	5,330
	B	1,71	3,40	2,555	5,127
	C	1,72	3,01	2,365	4,393
8	A	3,99	2,55	3,270	8,398
	B	4,12	1,81	2,963	6,895
	C	4,42	1,84	3,130	7,694
9	A	4,48	3,02	3,750	11,045
	B	4,59	2,30	3,445	9,321
	C	4,87	1,65	3,260	8,347

O estudo das forças máximas aplicadas nestes provetes, e tal como nos provetes de aço, foi separado em três grupos, neste caso por temperatura de pré-aquecimento dos provetes, 70, 90 e 110 °C. No Apêndice E é possível observar todos os gráficos obtidos para as diferentes combinações de parâmetros.

- **70°C**

No caso da temperatura de pré-aquecimento de 70°C, as combinações do Método de Taguchi englobadas são as numeradas de 1 a 3, sendo, desta forma, apresentado na tabela os valores médios e desvios padrão resultantes dos cálculos de secções e forças máximas aplicadas.

Tabela 23 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 70°C

Número da combinação	Secção Média (mm²)	Desvio Padrão - Secção Média (mm²)	Força Máxima média (N)	Desvio Padrão – Força Máxima média (N)
1	5,97	0,556	331,29	17,36
2	9,87	1,467	554,89	118,25
3	12,86	1,245	659,83	134,93

Os resultados acima apresentados permitem identificar as variações existentes tanto ao nível das secções como das forças máximas mediante a combinação de parâmetros em utilização. Para esta temperatura de pré-aquecimento, ocorre uma variação muito mais acentuada nas secções do ponto de rotura levando, também, a variações acentuadas da força máxima aplicada, na medida em que uma secção de ponto de rotura superior leva a uma força máxima também superior.

Nas três combinações em estudo é, também, notório o aparecimento de zonas de fusão, ou seja, “nugget” muito inferiores ao valor expectável com base no elétrodo de 6 mm de diâmetro.

A figura 71 apresenta um gráfico Força/Deslocamento comparativo de um provete proveniente de cada uma das combinações de Taguchi previamente referidas, sendo o provete representativo de cada combinação de parâmetros escolhido com base no provete que apresenta maior força máxima ao longo do ensaio.

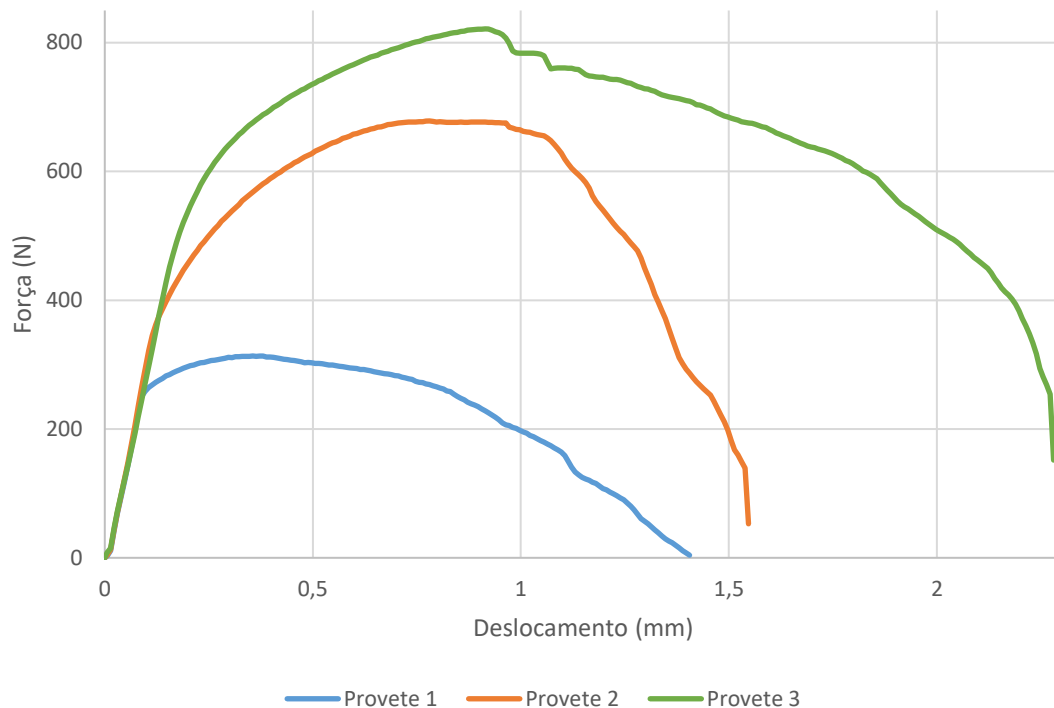


Figura 71 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 70°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

O gráfico Força/Deslocamento permite observar que, apesar das variações de força média nas combinações 2 e 3, estes apresentam o seu ponto de força máxima aproximadamente no mesmo deslocamento. No provete 1 o declive inicial da curva é muito semelhante aos outros dois, variando apenas a amplitude da força no momento de transição para a zona plástica. Esta variação existente nas curvas é notória ao nível do deslocamento, onde os provetes com menor secção, combinação 1, apresenta um deslocamento inferior às combinações com maiores secções de ponto de soldadura, 2 e 3, respetivamente.

Nestes ensaios, a rotura dos pontos ocorreu sempre na zona de interface, tal como se observa na figura 72.



Figura 72 – Foto de rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 1A fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)

- **90°C**

Tal como na temperatura previamente referida, na tabela 24 apresentam-se os valores médios e desvios padrão para os valores obtidos de secção após rotura e força máxima para as combinações de parâmetros 4, 5 e 6.

Tabela 24 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 90°C

Número da combinação	<i>Secção Média (mm²)</i>	<i>Desvio Padrão - Secção Média (mm²)</i>	<i>Força Máxima média (N)</i>	<i>Desvio Padrão – Força Máxima média (N)</i>
4	4,75	0,630	265,19	2,26
5	10,49	2,229	492,86	136,27
6	9,02	1,599	406,41	115,53

Estes resultados permitem identificar, tal como nos anteriores, variações acentuadas nas secções obtidas, e valores muito inferiores aos inicialmente esperados. Nos valores referentes às forças máximas é notório o aparecimento de valores inferiores aos obtidos nas diferentes combinações estudadas com a temperatura de pré-aquecimento de 70°C, podendo esta variação ser influenciada pelos valores de parâmetros em utilização, ou pelo aumento da temperatura de pré-aquecimento.

A figura 73 apresenta o gráfico Força/Deslocamento representativo dos melhores provetes para cada uma das combinações de parâmetros que englobam a temperatura de pré-aquecimento de 90°C.

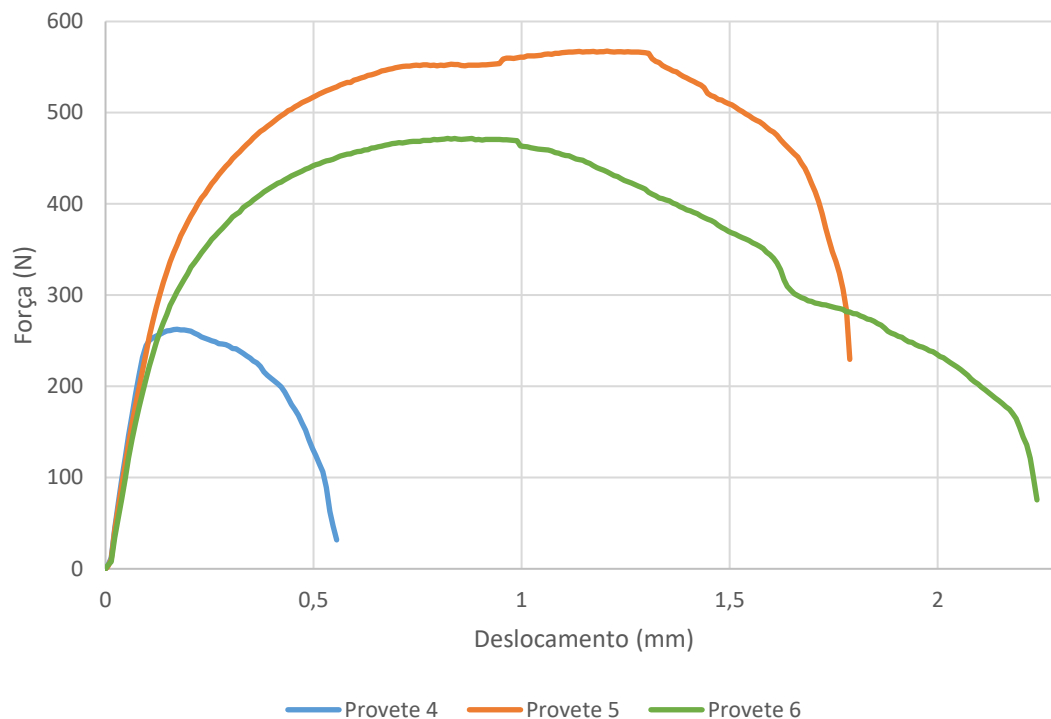


Figura 73 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 90°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

Tal como no caso anterior, o gráfico Força/Deslocamento demonstra a redução acentuada do deslocamento no caso dos provetes com reduzida secção observada. No caso dos provetes 5 e 6 as curvas apresentam-se mais próximas entre si, mas, em contraste com as curvas dos provetes 2 e 3, a secção superior não levou ao aparecimento de um deslocamento superior na rotura.

Nestes ensaios, a rotura dos pontos ocorreu sempre na zona de interface, tal como se observa na figura 74.



Figura 74 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 5C fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)

- **110°C**

As combinações finais do Método de Taguchi, 7, 8 e 9, representam os provetes realizados em alumínio com pré-aquecimento de 110°C, apresentando-se estes resultados na tabela 25.

Tabela 25 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 com a temperatura de pré-aquecimento de 110°C

Número da combinação	Secção Média (mm ²)	Desvio Padrão - Secção Média (mm ²)	Força Máxima média (MPa)	Desvio Padrão – Força Máxima média (MPa)
7	4,95	0,402	211,25	95,01
8	7,66	0,614	425,34	19,42
9	9,57	1,116	444,14	64,77

Tal como aconteceu com a temperatura de pré-aquecimento de 90°C, nas combinações de parâmetros 7, 8 e 9, ocorre uma descida das forças máximas aplicadas aquando da sua comparação com os valores obtidos para a temperatura de pré-aquecimento de 70°C. Nesta gama de temperatura ocorreu uma aproximação dos valores de secção média medidos após rotura, podendo este resultado ser, também, obtido devido à combinação de tempo de soldadura e corrente de soldadura em utilização. Para estas três combinações de parâmetros, a figura 75 apresenta o gráfico Força/Deslocamento comparador dos melhores provetes ensaiados.

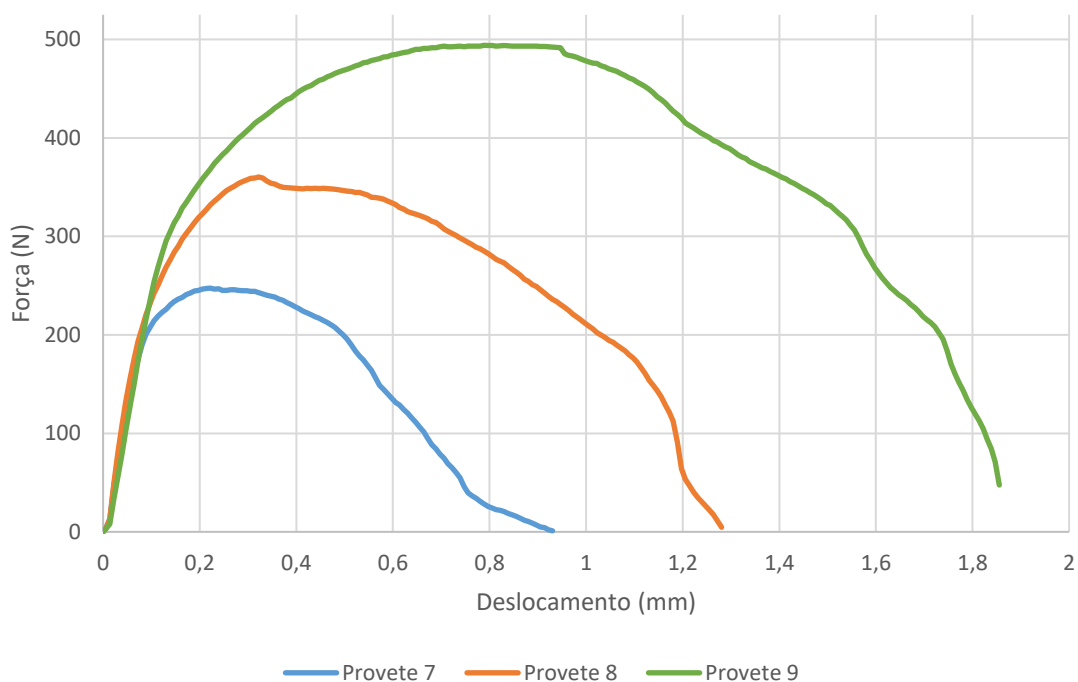


Figura 75 – Comparação para os provetes de alumínio 1050 com pré-aquecimento a 110°C que apresentam a maior força máxima para as diferentes combinações de parâmetros

Na figura 76 é possível observar a rotura do ponto de soldadura, ocorrendo em todos os ensaios na zona da interface do mesmo.

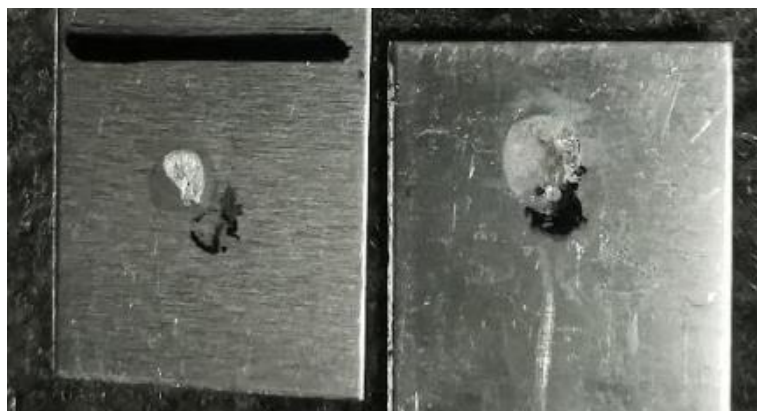


Figura 76 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 9A fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)

4.2.2. Método de Taguchi

Posteriormente à realização dos ensaios de corte e sua análise, foi iniciado o estudo da melhor combinação de parâmetros com base no Método de Taguchi, sendo este realizado com base nas tabelas 10 e 26.

Tabela 26 – Valores de força máxima (N) referentes ao Método de Taguchi para os provetes em alumínio 1050

Número da combinação	Força Máxima (N)
1	331,29
2	554,89
3	659,83
4	265,19
5	492,86
6	406,41
7	211,25
8	425,34
9	444,14

Assim como na análise dos provetes de aço, para os provetes de alumínio recorreu-se ao software Minitab com a opção de “*Larger is Better*” para os valores de “*Signal-to-Noise Ratio*”. Neste estudo

o software determinou a utilização de níveis para os diferentes parâmetros, sendo estes apresentados na tabela 27.

Tabela 27 – Níveis em utilização para os diferentes parâmetros de soldadura dos provetes de alumínio 1050 com base no software Minitab

Nível	Temperatura de pré-aquecimento	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	70,0	0,65	9
2	90,0	0,83	12
3	110,0	0,95	18

Esta análise permitiu obter a tabela 28 onde se apresentam os valores de resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” para os diferentes níveis e parâmetros em estudo.

Tabela 28 – Tabela de resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050

Nível	Temperatura	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	53,89	48,46	51,72
2	51,50	53,77	52,10
3	50,67	53,84	52,25
Delta	3,22	5,38	0,53
Importância	2	1	3

Os resultados obtidos apresentam uma dispersão mais relevante entre ambos aquando da sua comparação com os valores obtidos para os provetes em aço St12, sendo neste caso mais influente o parâmetro de corrente de soldadura seguido pela temperatura e, por fim, com um valor de delta muito reduzido, o tempo de soldadura.

O aparecimento de um delta elevado no parâmetro de pré-aquecimento dos provetes permite demonstrar a significância de aplicação deste processo aquando da soldadura de provetes fabricados em alumínio.

A figura 77 apresenta graficamente os valores obtidos na tabela 28.

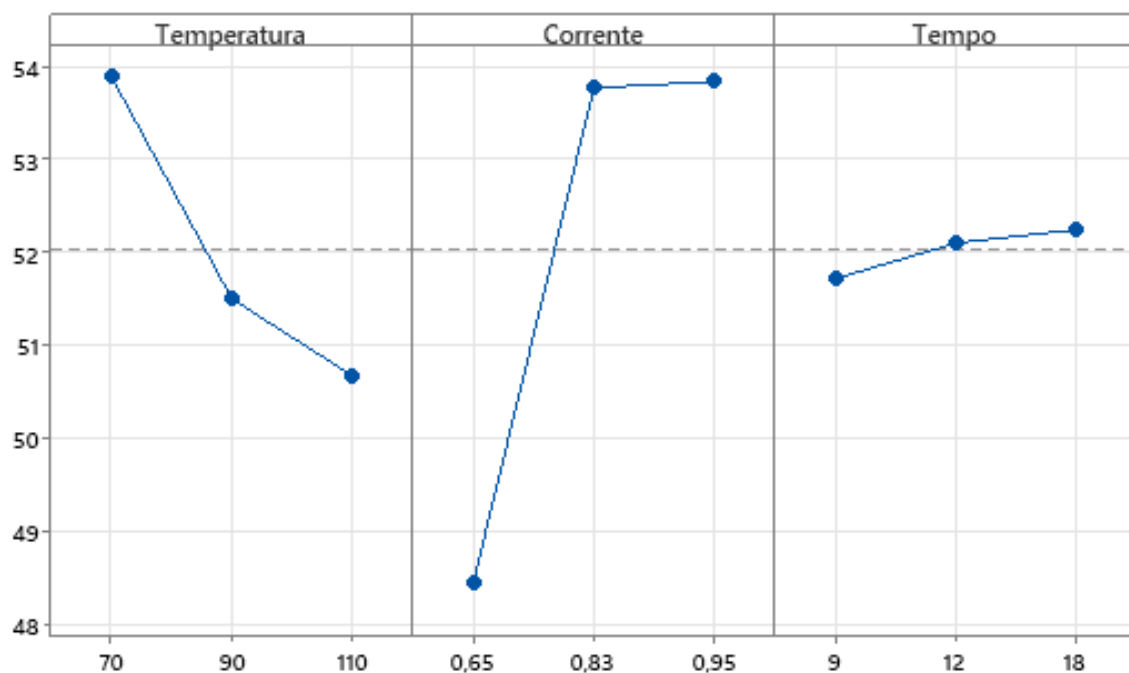


Figura 77 – Representação gráfica da resposta do “*Signal-to-Noise Ratio*” após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050

Estes resultados de importância foram também notórios aquando do estudo dos valores médios obtidos do software. Na tabela 29 é possível visualizar estes resultados e, na figura 78, a sua representação gráfica.

Tabela 29 – Tabela de resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050

Nível	Temperatura	Corrente de soldadura	Tempo de soldadura
1	515,3	269,2	387,7
2	388,2	491,0	421,4
3	360,2	503,5	454,6
Delta	155,1	234,2	67,0
Importância	2	1	3

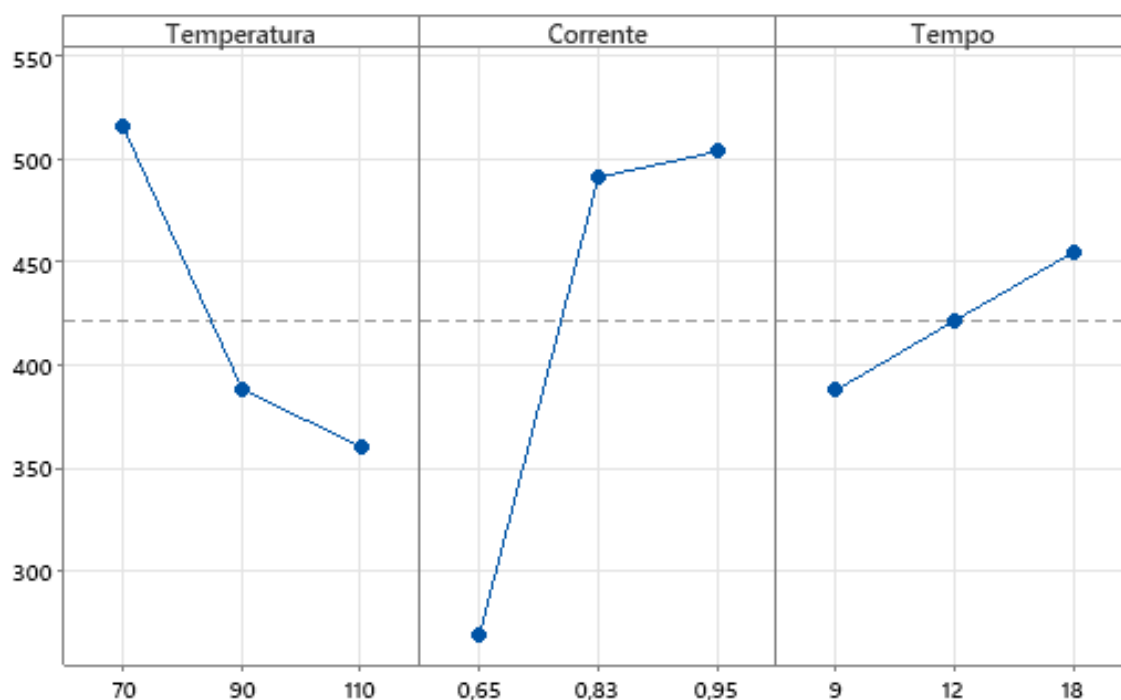


Figura 78 – Representação gráfica da resposta dos valores médios após a aplicação do Método de Taguchi para os provetes fabricados em alumínio 1050

Assim como no estudo dos resultados obtidos nos provetes em aço, foi realizada uma análise comprovativa dos resultados com base no valor p , sendo este comparado com o valor de alfa definido de 5%. Estes resultados encontram-se presentes na tabela 30.

Tabela 30 – Resultados de valor de p referentes à aplicação do Método de Taguchi para os provetes de alumínio 1050

Fator	Valor de p
Temperatura de pré-aquecimento	0,114
Intensidade de corrente	0,048
Tempo de soldadura	0,440

Assim como previamente observado, nos ensaios relativos ao alumínio 1050, apenas foi possível obter um parâmetro como estatisticamente significativo, sendo este a intensidade de corrente. Apesar destes resultados, o valor p deste parâmetro apresenta-se muito próximo do valor de alfa. Os outros parâmetros apresentam discrepâncias mais elevadas, sendo o valor p da temperatura de pré-aquecimento aproximadamente o dobro do valor alfa e para o parâmetro de tempo de soldadura este valor é, aproximadamente, nove vezes superior, encontrando-se ambos consequentemente sem significância estatística. A obtenção de valores de p muito elevados pode ser proveniente das variações de força máximas obtidas dentro da mesma combinação de parâmetros, sendo necessário a realização de mais ensaios significativos de forma a obter um valor médio mais próximo do real.

Apesar destes resultados, foi possível obter uma estimativa com base neste método para a melhor combinação de parâmetros a aplicar, encontrando-se esta apresentada na tabela 31 e tendo sido previamente estudada como combinação de parâmetros 3.

Tabela 31 – Parâmetros em utilização para a obtenção dos resultados mais elevados de força máxima nos provetes de alumínio 1050 com base no Método de Taguchi

Número da combinação	Temperatura de pré-aquecimento (°C)	Intensidade de Corrente (A / % de corrente)	Tempo de soldadura (ciclos)
2	70,0	13300 / 95	18

Uma vez que os resultados para esta combinação de parâmetros foram previamente apresentados de forma simplificada, na figura 79, encontra-se o gráfico Força/Deslocamento representativo dos 3 melhores provetes ensaiados, tendo sido realizado no total 6 como forma de comprovação do Método de Taguchi. Os resultados médios apresentados na tabela 32 têm por base todos os provetes analisados e, desta forma, representam o aumento da média obtida com os últimos 3 provetes ensaiados. Os gráficos Força/Deslocamento individuais para os diferentes provetes encontram-se presentes no apêndice F.

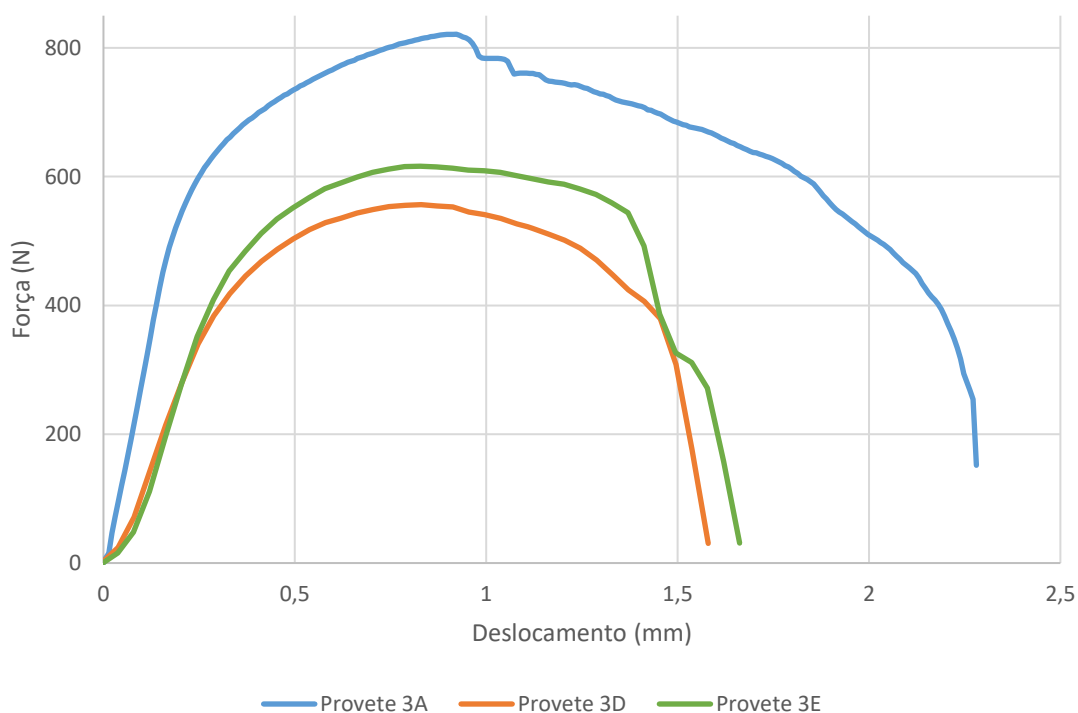


Figura 79 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos diferentes provetes, A, D e E fabricados em alumínio 1050 com base na combinação de parâmetros número 3 do Método de Taguchi

Tabela 32 – Tabela resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte para os provetes de alumínio 1050 da combinação de parâmetros 3

Número da combinação	Secção Média (mm²)	Força Máxima média (N)
3	12,86	666,17

Na figura 80 é possível observar um ponto de soldadura de um dos provetes após realização do ensaio de corte.

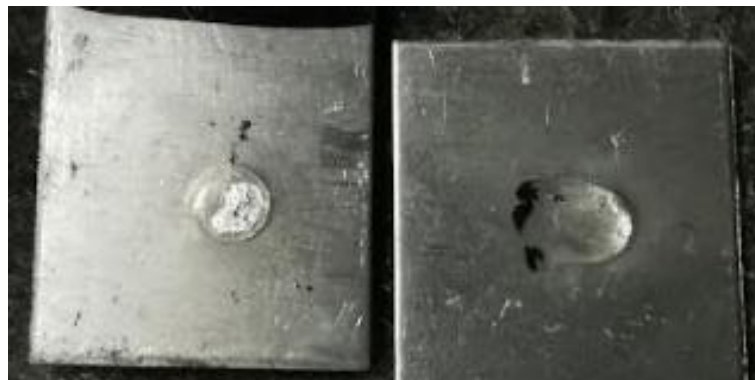


Figura 80 – Foto da rotura do ponto de soldadura proveniente do ensaio de corte no provete 3E fabricado em alumínio 1050 (zona interna – esquerda; zona externa – direita)

Posteriormente à análise dos resultados, e de forma a permitir identificar o comportamento do material quanto à sua dureza, foram realizadas medições de microdureza ao longo de toda a largura de ambas as chapas soldadas no zona central do ponto de soldadura, permitindo assim obter os resultados de dureza do material de base e das diferentes zonas existentes posteriormente à soldadura. Na figura 81 é possível observar a variação de dureza ao longo do provete.

Estes resultados demonstram que, ao contrário do que aconteceu nos provetes realizados em aço St12, nos provetes de alumínio, ocorre uma redução da dureza na zona central do ponto de soldadura.

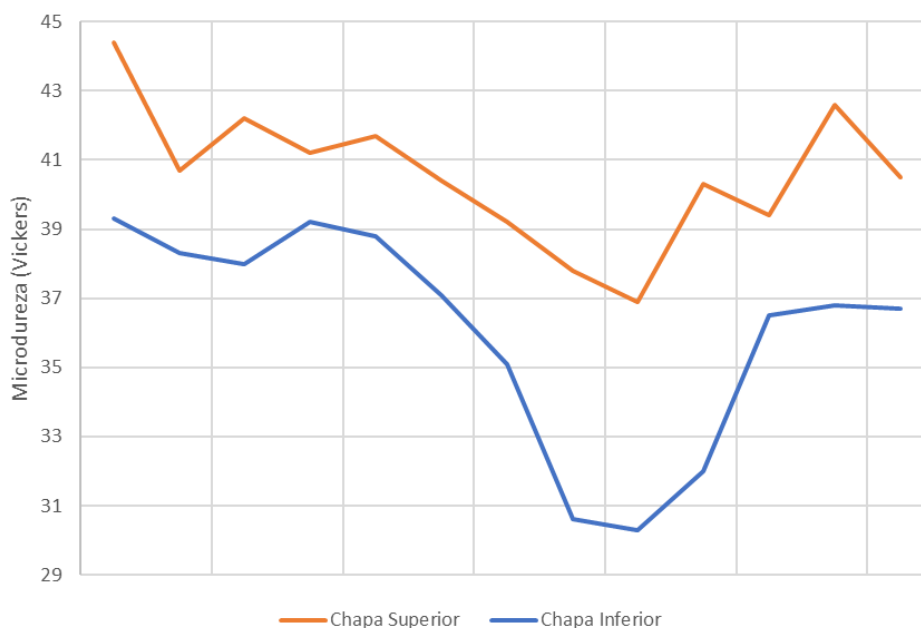


Figura 81 – Comparação das durezas medidas pelo método de Vickers nas duas chapas em utilização para a soldadura do provete fabricado em alumínio com a combinação de Taguchi número 3

4.2.3. Ensaios complementares realizados no alumínio 1050

Após a conclusão dos ensaios realizados relativamente ao Método de Taguchi, foram ainda estudadas duas variações com base nos parâmetros obtidos. Desta forma, e tal como inicialmente descrito, foi realizada a par com os pré-aquecimentos, a soldadura de provetes à temperatura ambiente, mas com os parâmetros de tempo e corrente de soldadura equivalentes às diferentes combinações analisadas, tendo-se obtido apenas 4 provetes com aparecimento do “nugget”, sendo estas as combinações 4, 6, 8 e 9. Destes provetes, e após a realização dos ensaios de corte, observou-se o aparecimento de apenas uma combinação onde os provetes soldados à temperatura ambiente apresentam forças máximas superiores aos soldados com pré-aquecimento, combinação 6, sendo nos restantes observável uma descida considerável deste valor.

A tabela 33 apresenta os resultados obtidos na combinação de parâmetros 6 com o pré-aquecimento e à temperatura ambiente.

Tabela 33 – Resultados de força máxima obtidos nos ensaios de corte realizados para a combinação de parâmetros 3 do alumínio 1050 utilizando pré-aquecimento e sem pré-aquecimento

Número da combinação	Força Máxima (N)	
	Pré-aquecimento a 90°C	Temperatura ambiente
6	406,41	531,15

Na figura 82 é possível observar um gráfico comparador dos provetes que apresentam maior força máxima, tanto nos que foram soldados com pré-aquecimento como nos soldados à temperatura ambiente.

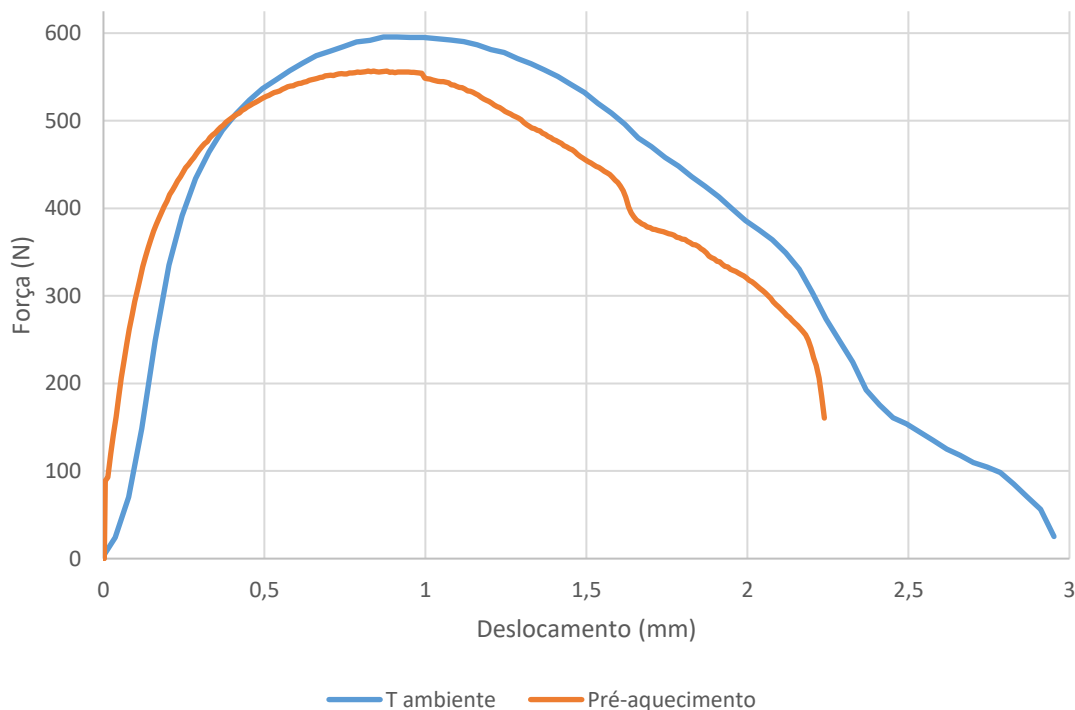


Figura 82 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes realizados para a combinação de parâmetros 6 com pré-aquecimento e sem pré-aquecimento

Estes resultados apesar de positivos, no sentido de permitir realizar a correta soldadura por pontos em chapas de alumínio sem pré-aquecimento, não é representativo dos resultados gerais deste processo, podendo desta forma ser explicado por uma feliz aleatoriedade na escolha dos parâmetros. Neste sentido os valores médios de força máxima nos provetes sem pré-aquecimento continuam a ser substancialmente inferiores aos dos provetes soldados com recurso aos melhores parâmetros obtidos pelo método de Taguchi.

Finalizando os ensaios estudados realizaram-se 3 provetes com a melhor combinação de parâmetros, mas apresentando dois pontos de soldadura nos mesmos. Estes ensaios tinham como objetivo permitir identificar se o aumento do número de pontos levaria à rotura dos provetes nos substratos, não sendo isto verificado. Na tabela 34 apresentam-se os resultados médios de força e secção obtidos nestes provetes.

Nestes provetes foi realizado o seu pré-aquecimento e soldadura do primeiro ponto, sendo posteriormente reaquecidos até à temperatura pretendido e finalizada a realização do segundo ponto.

Tabela 34 – Resultados médios de força e secção obtidos nos provetes realizados com a combinação de parâmetros 3 e dois pontos de soldadura

Proвете	Força Máxima (N)	Secção dos provetes (mm ²)
Combinação 3 com dois pontos de soldadura	890,73	19,74

A figura 83 apresenta o gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes que apresentam maior força máxima para os ensaios com um e dois pontos de soldadura tendo por base a combinação de parâmetros 3.

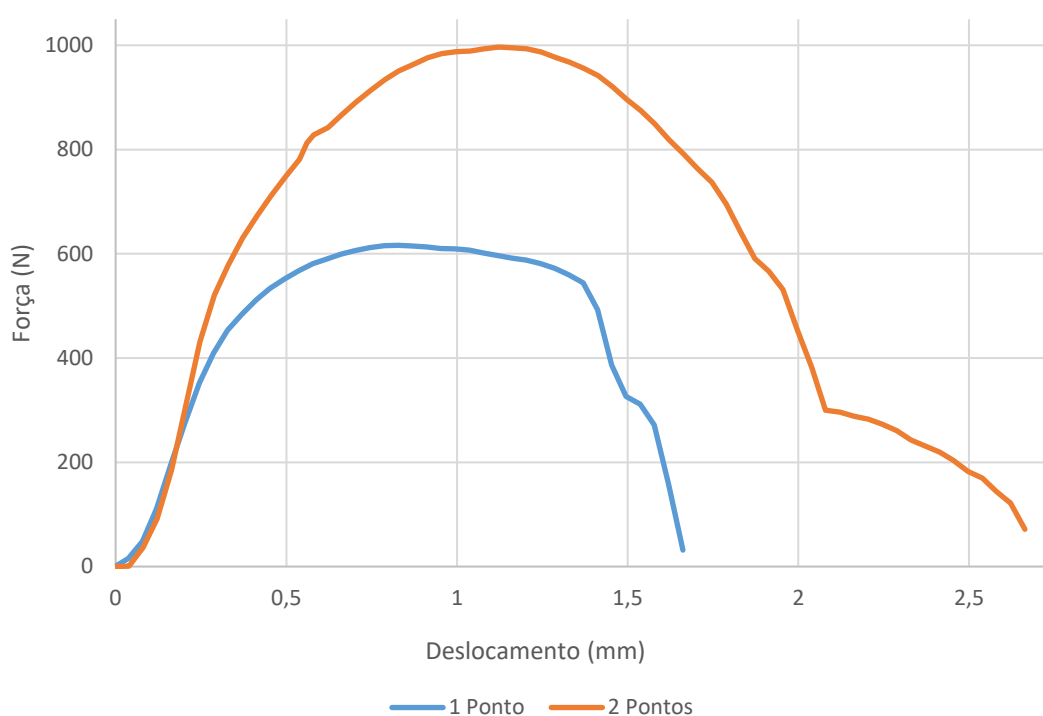


Figura 83 – Gráfico Força/Deslocamento comparador dos provetes realizados com a combinação de parâmetros 3 e um e dois pontos de soldadura

A realização de dois pontos de soldadura permite o aumento da força máxima para aproximadamente 900 N. Contudo, verificou-se que o mecanismo de rotura permaneceu idêntico.

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo são realizadas as conclusões finais sobre o trabalho realizado, quer com as juntas em aço, quer com as juntas em alumínio. A finalizar são indicadas algumas das limitações verificadas durante o trabalho experimental e apontados alguns caminhos possíveis para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões finais

Finalizando-se o estudo dos resultados obtidos é possível obter-se diversas conclusões sendo as principais separadas pelos dois materiais em estudo. Apesar da separação dos resultados é possível referir que em ambos os materiais a aplicação do método de Taguchi demonstrou-se como válida e permitiu determinar a melhor combinação de parâmetros entre os valores escolhidos para este estudo.

No caso dos provetes realizados em aço St12, foi notório que o aumento da espessura dos provetes, assim como expectável, promoveu um aumento acentuado da força máxima, sendo a rotura de escolha o arrancamento, benéfico neste tipo de juntas. Neste material, o método de Taguchi determinou como combinação ótima a definida pelo fabricante, apesar de apenas considerar um dos parâmetros em utilização como estatisticamente significativo. Por fim, no estudo das durezas, identificou-se um aumento da dureza do “*nugget*” com a diminuição da espessura das chapas derivado da redução do tempo de arrefecimento das mesmas. Neste material os melhores parâmetros foram para a espessura de 2 mm de chapa e utilizando 18 ciclos de tempo de soldadura e 13 300 A de corrente de soldadura.

A aplicação do método de Taguchi nos provetes fabricados em alumínio 1050 demonstrou uma redução da força máxima com o aumento da temperatura de pré-aquecimento, sendo então benéfico identificar-se a gama de temperaturas ideal para este processo. O modo de rotura neste material dá-se, em todos os ensaios, na interface do ponto de soldadura, reduzindo desta forma a força máxima enquanto da sua comparação com o arranque por arrancamento. As medições de durezas neste material foram também demonstrativas da redução de dureza que ocorre na zona do ponto em comparação com o material de base, sendo esta proveniente do rápido arrefecimento do material, não permitindo assim que o material readquira a dureza de base. Neste material a melhor combinação de parâmetros obtida apresentou-se com uma temperatura de pré-aquecimento de 70°C, 18 ciclos de tempo de soldadura e 13 300 A de intensidade de corrente elétrica.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Este estudo permitiu identificar limitações significativas sendo, na sua maioria, devido aos parâmetros escolhidos na aplicação do Método de Taguchi. Nos provetes de aço, uma vez que se

selecionou a espessura como parâmetro em estudo, este representa uma variação muito mais significativa que os outros dois, levando assim a uma redução acentuada da significância estatística dos restantes. Desta forma, e posteriormente a este estudo, seria adequado a realização de outro método de Taguchi onde se aplicariam apenas dois parâmetros, corrente de soldadura e tempo de soldadura, e vários níveis, permitindo assim identificar qual a melhor combinação para a espessura de 2 mm de chapa.

No alumínio, e uma vez que o nível de informação existente se apresenta reduzido, os níveis dos parâmetros em escolha podem não ter sido os mais adequados, sendo necessário a realização de um estudo mais intenso com níveis mais variados. No caso das temperaturas de pré-aquecimento, e uma vez que se identificou uma descida da força máxima com o aumento da temperatura, um estudo com base em valores de temperatura inferiores a 70°C será benéfico na obtenção da gama de temperaturas mais adequadas para o processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Shafee, B. B. Naik, and K. Sammaiah, "Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 2595–2604. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.215.
- [2] "What is Spot Welding? (A Complete Welding Process Guide) - TWI." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-spot-welding> (accessed Sep. 26, 2022).
- [3] K. Zhou and P. Yao, "Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding," *Mech Syst Signal Process*, vol. 124, pp. 170–198, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.YMSSP.2019.01.041.
- [4] Z. Salleh, Y. M. Taib, R. Nik, M. Masdek, and A. Ghazali, "Improvement of mechanical properties in treated spot welded joint," 2019. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- [5] S. B. Jamaludin, M. Hisyam, J. B. Shamsul, and M. M. Hisyam, "Study of spot welding of austenitic stainless steel type 304 Casting View project Cobalt Implant Composite View project Study Of Spot Welding Of Austenitic Stainless Steel Type 304," 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261727794>
- [6] "Spot Welding Explained | Fractory." <https://fractory.com/spot-welding-explained/> (accessed Sep. 26, 2022).
- [7] Francisco J. G. Silva, *Tecnologia da Soldadura - Uma abordagem técnico-didática*. Publindústria, Edições Técnicas, Lda, 2014.
- [8] "Electrode Configurer - Electrode Shape - Spot Weld, Inc." <http://spotweldinc.com/products/electrode-configurer-electrode-shape/> (accessed Oct. 17, 2022).
- [9] C. DiGiovanni, L. He, U. Pistek, F. Goodwin, E. Biro, and N. Y. Zhou, "Role of spot weld electrode geometry on liquid metal embrittlement crack development," *J Manuf Process*, vol. 49, pp. 1–9, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.015.
- [10] "SPOT WELDING TECHNICAL INFORMATION - Tite-Spot Welders." <https://www.titespot.com/spot-welding-technical-information/> (accessed Sep. 27, 2022).
- [11] "Spot Welding Explained: What is It? And How Does it Work?" <https://weldguru.com/what-is-spot-welding/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [12] "What Is Spot Welding? | OneMonroe." <https://monroeengineering.com/blog/what-is-spot-welding/> (accessed Sep. 27, 2022).
- [13] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, and E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," *Mater Des*, vol. 29, no. 7, pp. 1427–1431, 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.09.004.

- [14] S. H. Mousavi Anijdan, M. Sabzi, M. Ghobeiti-Hasab, and A. Roshan-Ghiyas, "Optimization of spot welding process parameters in dissimilar joint of dual phase steel DP600 and AISI 304 stainless steel to achieve the highest level of shear-tensile strength," *Materials Science and Engineering A*, vol. 726, pp. 120–125, May 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.04.072.
- [15] S. K. Khanna, C. He, and H. N. Agrawal, "Residual stress measurement in spot welds and the effect of fatigue loading on redistribution of stresses using high sensitivity Moiré interferometry," *J Eng Mater Technol*, vol. 123, no. 1, pp. 132–138, 2001, doi: 10.1115/1.1286218.
- [16] T. Chen, Z. Ling, M. Wang, and L. Kong, "Effect of a slightly concave electrode on resistance spot welding of Q&P1180 steel," *J Mater Process Technol*, vol. 285, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116797.
- [17] H. R. M. Costa, J. M. L. Reis, J. P. B. Souza, P. M. C. L. Pacheco, R. A. A. Aguiar, and S. De Barros, "Experimental investigation of the mechanical behaviour of spot welding-adhesives joints," *Compos Struct*, vol. 133, pp. 847–852, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.036.
- [18] G. Wu *et al.*, "Experiment and modeling on fatigue of the DP780GI spot welded joint," *Int J Fatigue*, vol. 103, pp. 73–85, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.05.017.
- [19] S. Midhun, D. C. Ramesh, K. Chellamuthu, and R. Yokeswaran, "Dissimilar resistance spot welding process on AISI 304 and AISI 202 by investigation metals," *Mater Today Proc*, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.262.
- [20] Z. L. Ni and F. X. Ye, "Ultrasonic spot welding of Al sheets by enhancing the temperature of weld interface," *Mater Lett*, vol. 208, pp. 69–72, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2017.05.009.
- [21] "Solda contínua por rolos | KUKA AG." <https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/tecnologias-de-processo/solda-cont%C3%ADnua-por-rolos> (accessed Oct. 03, 2022).
- [22] "Sunstone Welders > Applications > Filtration & Mesh." <https://sunstonewelders.com/applications/filtration-mesh-micro-welding/> (accessed Oct. 03, 2022).
- [23] "Resistance Seam Welding (RSEW) Advantages and Disadvantages - Mechanical Engineering." <http://mechanicalinventions.blogspot.com/2014/09/resistance-seam-welding-rsew-advantages-disadvantages.html> (accessed Oct. 05, 2022).
- [24] "Projection Welding - Tec-Option." <https://tec-option.com/projection-welding/> (accessed Oct. 21, 2022).
- [25] "What is Projection Welding | Advantages , Application." https://learnmech.com/what-is-projection-welding-advantages-application/#What_is_Projection_Welding (accessed Oct. 21, 2022).

- [26] "What is a projection weld? - How-To Resistance Weld." <https://www.howtoresistanceweld.info/projection-welding/what-is-a-projection-weld.html> (accessed Oct. 21, 2022).
- [27] "Spot Welding Copper Strips to 18650 Battery Cells - Page 3 - Endless Sphere." <https://endless-sphere.com/forums/viewtopic.php?t=84680&start=50> (accessed Oct. 21, 2022).
- [28] A. Kumar Mandal, M. L. Meena, A. Kumar Chaudhary, A. Patidar, and B. L. Gupta, "Comparative analysis of resistance spot welded and weld bonded joint of al 6082-T651," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 4079–4085. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.446.
- [29] T. Sadowski, P. Golewski, and M. Kneć, "Experimental investigation and numerical modelling of spot welding-adhesive joints response," *Compos Struct*, vol. 112, no. 1, pp. 66–77, 2014, doi: 10.1016/j.compstruct.2014.01.008.
- [30] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi, and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 3, pp. 217–225, Apr. 2007, doi: 10.1179/174329307X164409.
- [31] C. Summerville, P. Compston, and M. Doolan, "A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2019, pp. 305–312. doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.142.
- [32] "Spot Welding Robots Can Eliminate These Common Defects - RoboDK blog." <https://robodk.com/blog/spot-welding-eliminate-common-defects/> (accessed Nov. 24, 2022).
- [33] "5 Types of Resistance Welding Defects to Look Out for in Wire Baskets." <https://www.marlinwire.com/blog/resistance-welding-defects-to-look-out-for-in-wire-baskets> (accessed Nov. 24, 2022).
- [34] "5 Common Welding Defects, and How To Prevent Them - Tuffaloy Resistance Welding Products." <https://www.tuffaloy.com/resources/blog/welding-defects/5-common-welding-defects-and-how-to-prevent-them> (accessed Nov. 24, 2022).
- [35] "Avoiding spot weld surface splash or electrode sticking - TWI." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-how-can-i-avoid-surface-splash-or-electrode-sticking-in-resistance-spot-welding> (accessed Nov. 24, 2022).
- [36] "Minimising weld splash for spot weld quality and safety - TWI." <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-how-can-i-minimise-weld-splash-for-resistance-spot-weld-quality-and-safety-reasons> (accessed Nov. 24, 2022).
- [37] "What is the standard for indentation in resistance welding? - How-To Resistance Weld." <https://www.howtoresistanceweld.info/spot-welding/what-is-the-standard-for-indentation-in-resistance-welding.html> (accessed Nov. 24, 2022).

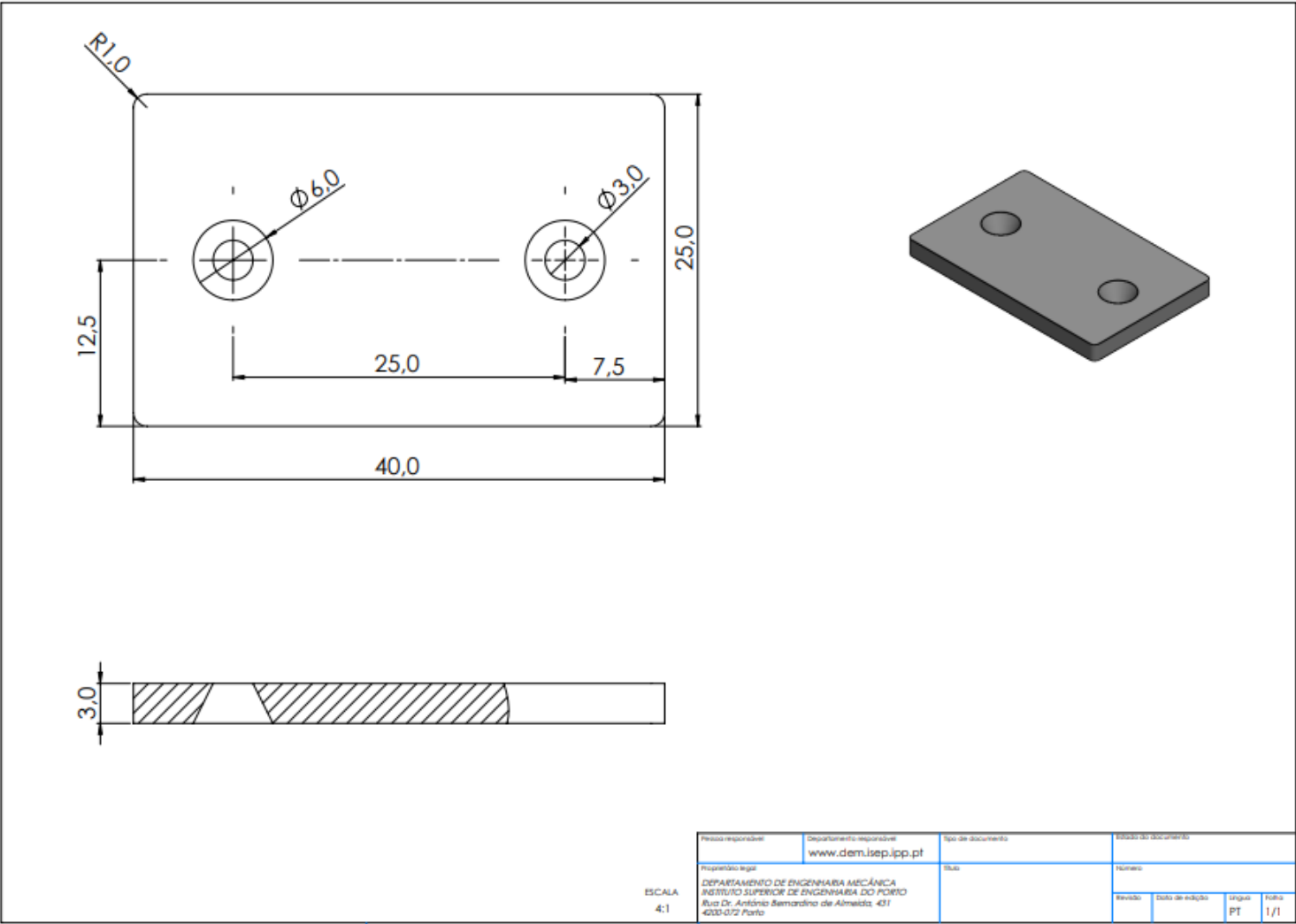
- [38] “Resistance Weld Help | Problem (Cracks and Holes in Weld Nugget) - Resistance Welding Supplies.” <https://www.resistanceweldsupplies.com/weld-help/issues/cracks-and-holes.html> (accessed Nov. 24, 2022).
- [39] R. S. Florea, D. J. Bammann, A. Yeldell, K. N. Solanki, and Y. Hammi, “Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy,” *Mater Des*, vol. 45, pp. 456–465, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.08.053.
- [40] “WeldHelp Resistance Welding Troubleshooting Guide - G.E. Schmidt.” <https://geschmidt.com/weldhelp-resistance-welding-troubleshooting/> (accessed Nov. 24, 2022).
- [41] H. Ghazanfari and M. Naderi, “Expulsion characterization in resistance spot welding by means of a hardness mapping technique,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 21, no. 9, pp. 894–897, Sep. 2014, doi: 10.1007/s12613-014-0986-6.
- [42] I. S. Hwang, M. J. Kang, and D. C. Kim, “Expulsion reduction in resistance spot welding by controlling of welding current waveform,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2011, pp. 2775–2781. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.461.
- [43] A. Runnemalm, J. Ahlberg, A. Appelgren, and S. Sjökvist, “Automatic inspection of spot welds by thermography,” *J Nondestr Eval*, vol. 33, no. 3, pp. 398–406, 2014, doi: 10.1007/s10921-014-0233-0.
- [44] “Ultrasonic Examination of Resistance Spot Welds.” <https://www.ndt.net/article/dgzfp03/papers/p01/p01.htm> (accessed Nov. 20, 2022).
- [45] “Can resistance spot welds be non-destructively tested? - TWI.” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-can-resistance-spot-welds-be-non-destructively-tested> (accessed Nov. 20, 2022).
- [46] “What is Lock-In Thermography? - MoviTHERM.” <https://movitherm.com/knowledgebase/what-is-lock-in-thermography/> (accessed Nov. 20, 2022).
- [47] “Lock-in Thermography - Intraspec Technologies.” <https://www.intraspec.com/en/our-techniques/lock-in-thermography/> (accessed Nov. 20, 2022).
- [48] “Infrared Thermal Analysis Using the Lock-in Method - JFE Techno-Research Corporation.” <https://www.jfe-tec.co.jp/en/infrared-camera/thermal-analysis.html> (accessed Nov. 20, 2022).
- [49] J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser, and W. Arnold, “Mechanisms and models for crack detection with induction thermography,” in *AIP Conference Proceedings*, 2008, pp. 475–482. doi: 10.1063/1.2902698.
- [50] A. Yin, B. Gao, G. Yun Tian, W. L. Woo, and K. Li, “Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography,” *J Appl Phys*, vol. 113, no. 6, Feb. 2013, doi: 10.1063/1.4790866.

- [51] I. Z. Abidin, M. Z. Umar, M. Y. Yusof, M. M. Ibrahim, A. R. Hamzah, and M. N. Salleh, "Advantages and Applications of Eddy Current Thermography Testing for Comprehensive and Reliable Defect Assessment," 2012. [Online]. Available: <http://www.ndt.net/?id=12656>
- [52] R. N. Shamimie, I. Z. Abidin, and H. A. A. Sidek, "Eddy Current Thermography: System Development and its Application in NDT."
- [53] S. Lee, J. Nam, W. Hwang, J. Kim, and B. Lee, "A study on integrity assessment of the resistance spot weld by infrared thermography," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2011, pp. 1748–1753. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.291.
- [54] "ISO 10447:2006(en), Resistance welding — Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds." <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10447:ed-2:v1:en> (accessed Nov. 15, 2022).
- [55] "peel and chisel testing Archives - AHSS Guidelines." <https://ahssinsights.org/tag/peel-and-chisel-testing/> (accessed Nov. 15, 2022).
- [56] "How To Carry Out A Spot Weld Peel Test." <https://www.basicwelding.co.uk/blogs/news/how-to-carry-out-a-spot-weld-peel-test> (accessed Nov. 15, 2022).
- [57] M. Raut and V. Achwal, "OPTIMIZATION OF SPOT WELDING PROCESS PARAMETERS FOR MAXIMUM TENSILE STRENGTH," 2014. [Online]. Available: www.ijmerr.com
- [58] "Spot Welding Parameters." http://www.robot-welding.com/Welding_parameters.htm (accessed Oct. 13, 2022).
- [59] "Spot welding parameters setting - optimal values for spotwelding parameters - Affordable premium quality pressure welding machines, point welding machines, cnc pressure welding machines - laser welding machines." <https://www.lowcostwelder.com/pt/profispot-pressure-welding-controllers/spot-welding-parameters-parameters-in-resistance-or-pressure-welding> (accessed Oct. 13, 2022).
- [60] "SPOT WELDING TECHNICAL INFORMATION - Tite-Spot Welders." <https://www.titespot.com/spot-welding-technical-information/> (accessed Oct. 14, 2022).
- [61] B. Wang *et al.*, "Microstructure and shearing strength of stainless steel/low carbon steel joints produced by resistance spot welding," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2668–2679, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.041.
- [62] H. R. Ghanbari, M. Shariati, E. Sanati, and R. Masoudi Nejad, "Effects of spot welded parameters on fatigue behavior of ferrite-martensite dual-phase steel and hybrid joints," *Eng Fail Anal*, vol. 134, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106079.
- [63] N. Kahraman, "The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets," *Mater Des*, vol. 28, no. 2, pp. 420–427, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2005.09.010.

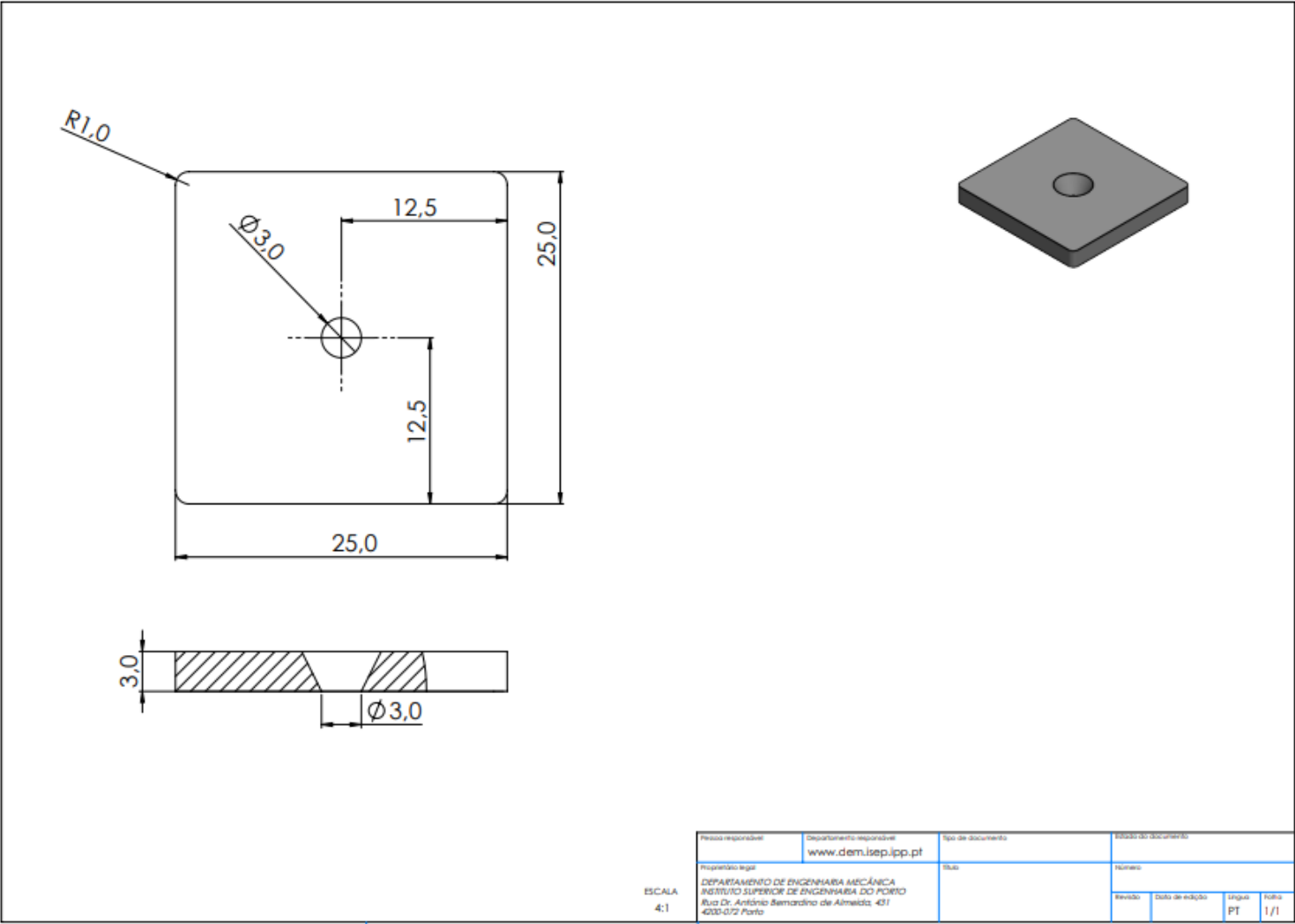
- [64] “Is there a minimum spacing between spot welds? - How-To Resistance Weld.” <https://www.howtoresistanceweld.info/spot-welding/is-there-a-minimum-spacing-between-spot-welds> (accessed Oct. 27, 2022).
- [65] M. Jafari Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, and J. Godek, “Theoretical analysis of shunting effect in resistance spot welding (RSW) of AA2219,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, vol. 39, no. 8, pp. 907–918, Nov. 2016, doi: 10.1080/02533839.2016.1215940.
- [66] J. Bi, J. L. Song, Q. Wei, Y. Zhang, Y. Li, and Z. Luo, “Characteristics of shunting in resistance spot welding for dissimilar unequal-thickness aluminum alloys under large thickness ratio,” *Mater Des*, vol. 101, pp. 226–235, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.04.023.
- [67] M. J. Vardanjani, A. Araee, J. Senkara, J. Jakubowski, and J. Godek, “Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of Al2219 sheets,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol. 64, no. 2, pp. 425–434, 2016, doi: 10.1515/BPASTS-2016-0048.
- [68] Y. Li and M. Lou, “Shunting effect in resistance spot welding steels-Part 2: Theoretical analysis Resistance spot weld-bonding View project Magnetic Assisted Arc Welding View project.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/297558677>
- [69] P. Ravichandran, C. Anbu, B. Meenakshipriya, and S. Sathiyavathi, “Process parameter optimization and performance comparison of AISI 430 and AISI 1018 in resistance spot welding process,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3389–3393. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.197.
- [70] Y. Kaya and N. Kahraman, “The effects of electrode force, welding current and welding time on the resistance spot weldability of pure titanium,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1–4, pp. 127–134, Apr. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3604-z.
- [71] F. A. Ghazali, Y. H. P. Manurung, and M. A. Mohamed, “Multi-response optimization using Taguchi method of resistance spot welding parameters,” in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 120–124. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.660.120.
- [72] Y. Yang, Y. Li, J. Bi, H. Liu, S. Ao, and Z. Luo, “Microstructure and mechanical properties of 2195/5A06 dissimilar joints made by resistance spot welding,” *Mater Charact*, vol. 191, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112147.
- [73] I. K. al Naimi, M. H. al Saadi, K. M. Daws, and N. Bay, “Influence of surface pretreatment in resistance spot welding of aluminum AA1050,” *Prod Manuf Res*, vol. 3, no. 1, pp. 185–200, Jan. 2015, doi: 10.1080/21693277.2015.1030795.
- [74] “What Is Steel Pickling? | National Material Company - Steel Processing Facilities.” <https://www.nationalmaterial.com/what-is-steel-pickling/> (accessed Nov. 24, 2022).

- [75] "Pickling: An Overview of This Metal Treatment Process | Blog Posts | OneMonroe." <https://monroeengineering.com/blog/pickling-an-overview-of-this-metal-treatment-process/> (accessed Nov. 24, 2022).
- [76] Y. Zhang *et al.*, "Effects of the oxide film on the spot joining of aluminum alloy sheets: a comparative study between resistance spot welding and resistance spot clinching," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, no. 9–12, pp. 4231–4240, Oct. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0387-x.
- [77] "Taguchi Method."
- [78] S. Rao, P. Samant, A. Kadampatta, and R. Shenoy, "An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications," *Int J Sci Eng Res*, vol. 4, no. 10, 2013, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [79] J. M. Cimbala, "Taguchi Orthogonal Arrays," 2014.
- [80] "What is the signal-to-noise ratio in a Taguchi design? - Minitab." <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/> (accessed Nov. 14, 2022).

APÊNDICE A

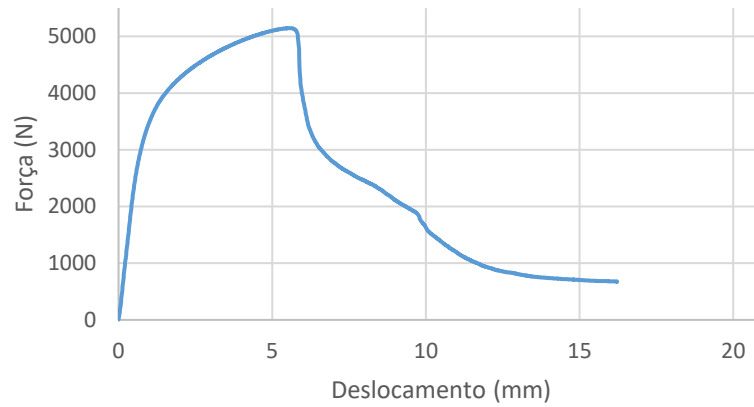


APÊNDICE B

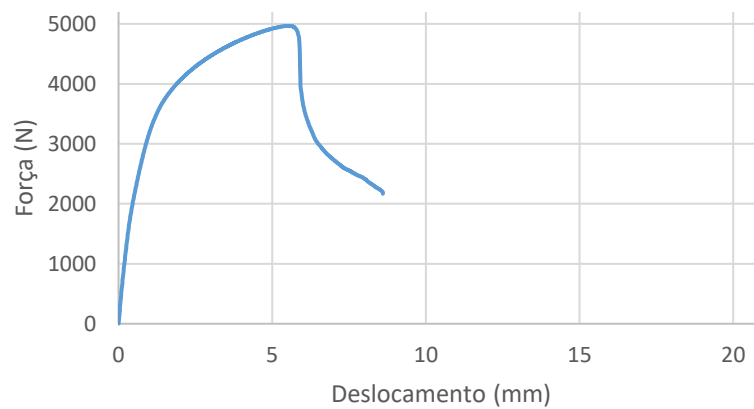


APÊNDICE C

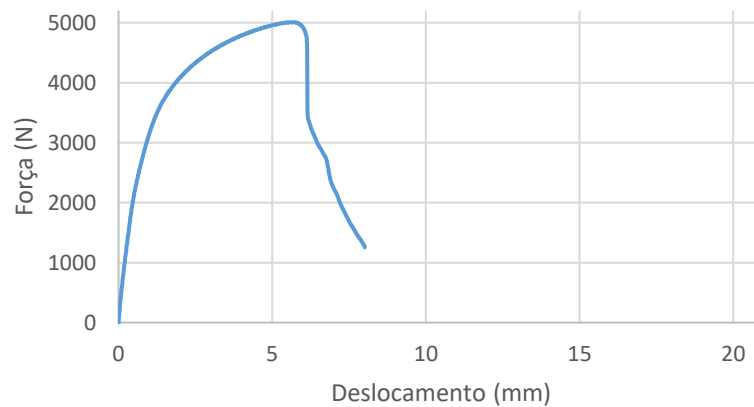
Provete Aço - 1A



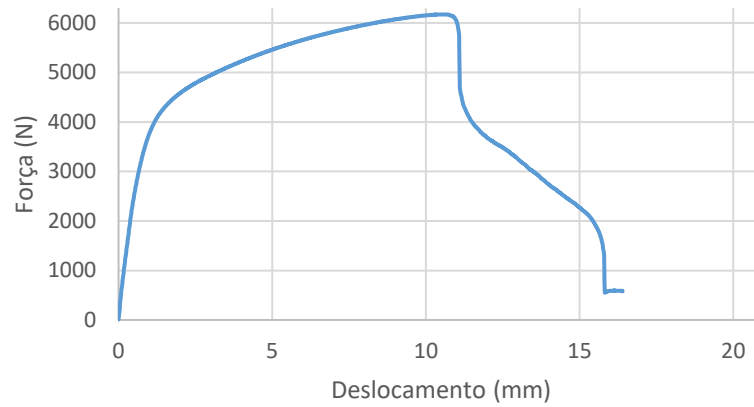
Provete Aço - 1B



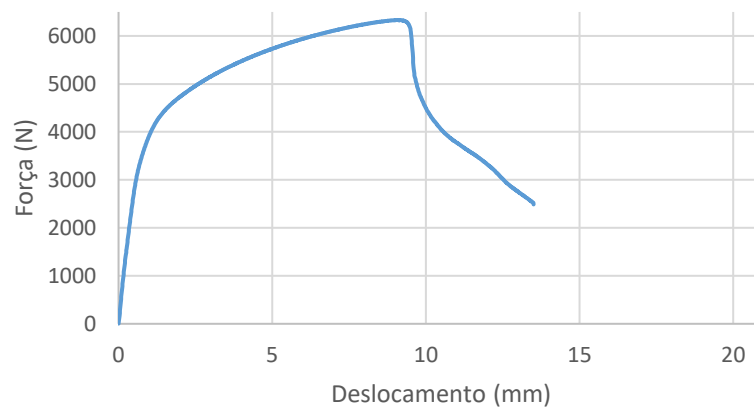
Provete Aço - 1C



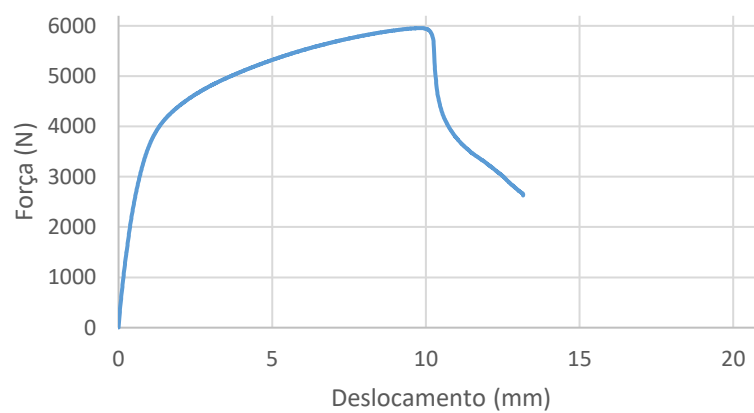
Provete Aço - 2A



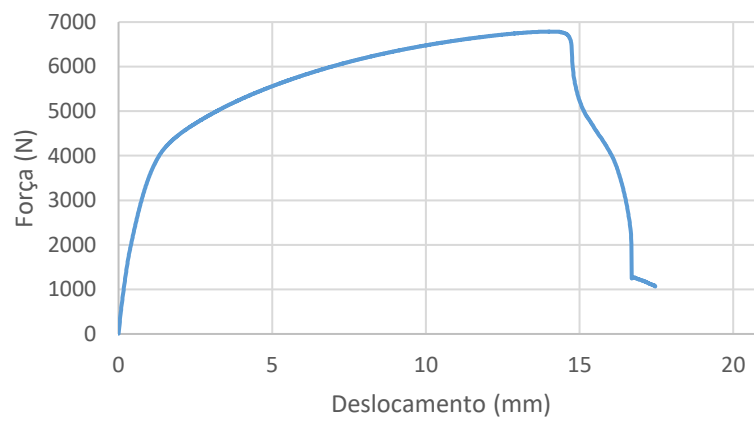
Provete Aço - 2B



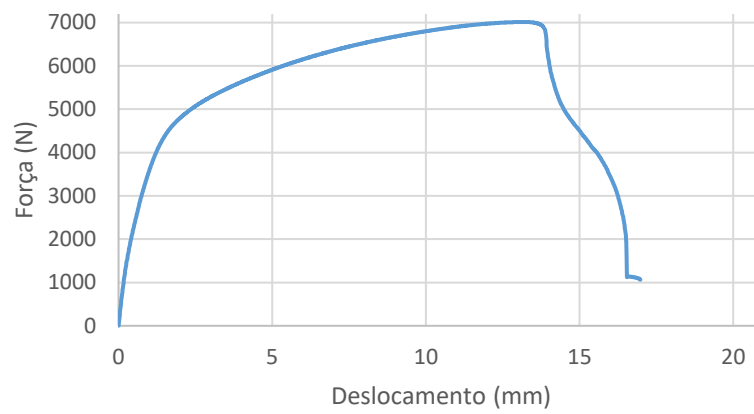
Provete Aço - 2C



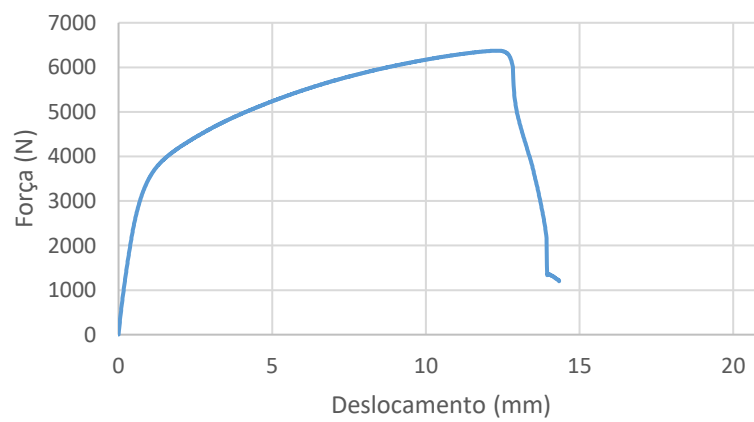
Provete Aço - 3A



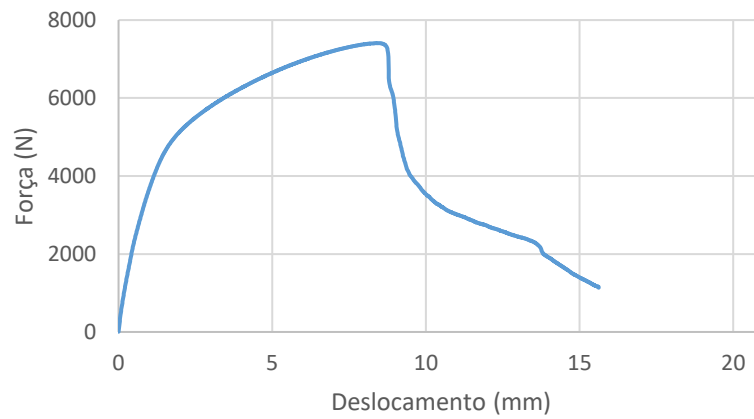
Provete Aço - 3B



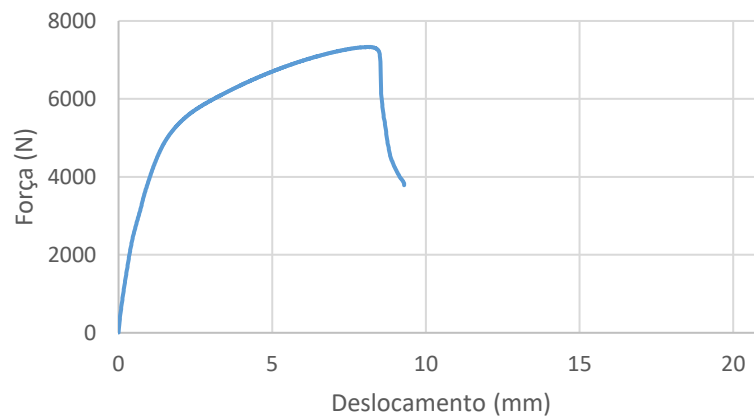
Provete Aço - 3C



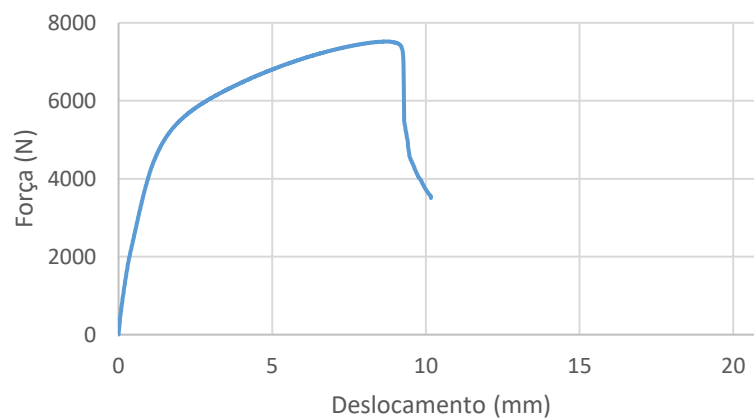
Provete Aço - 4A



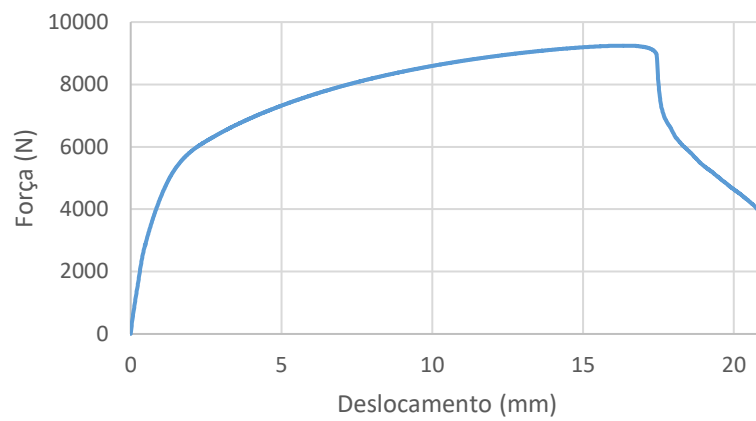
Provete Aço - 4B



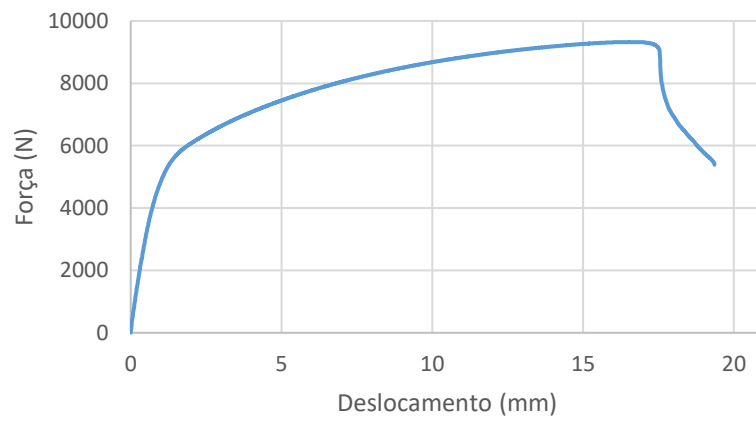
Provete Aço - 4C



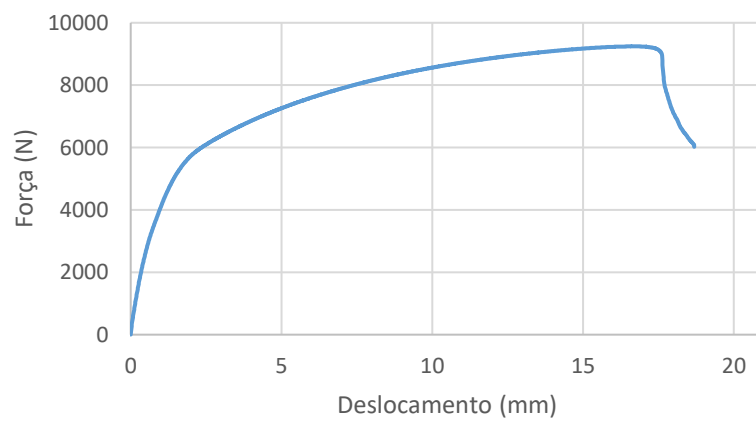
Provete Aço - 5A



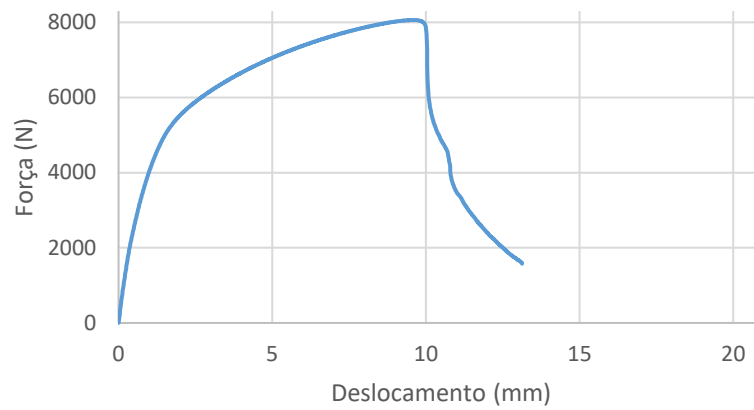
Provete Aço - 5B



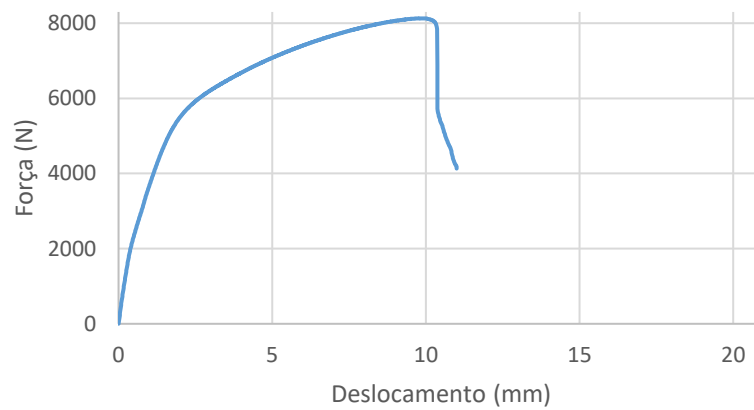
Provete Aço - 5C



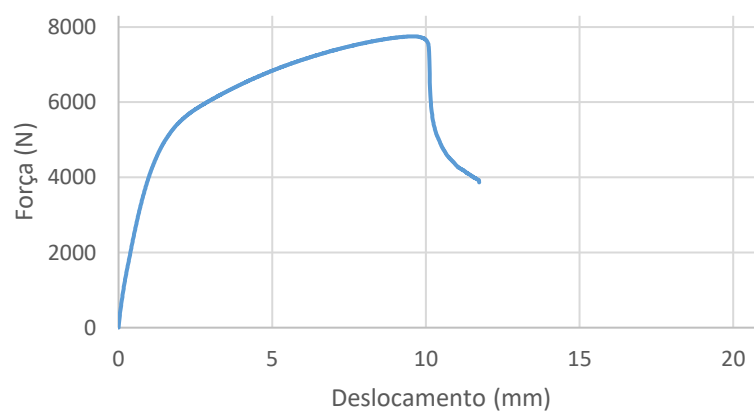
Provete Aço - 6A



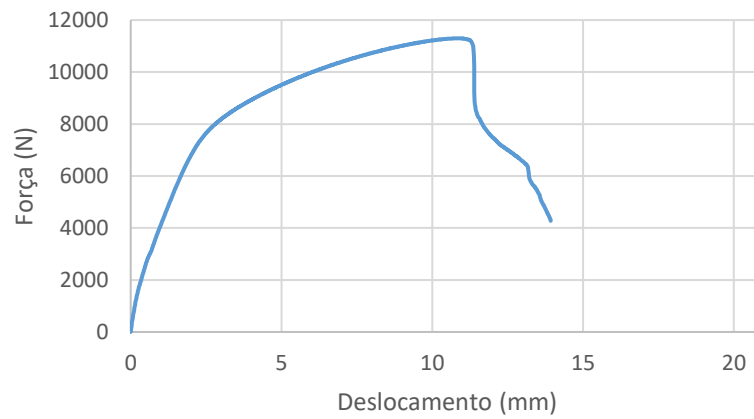
Provete Aço - 6B



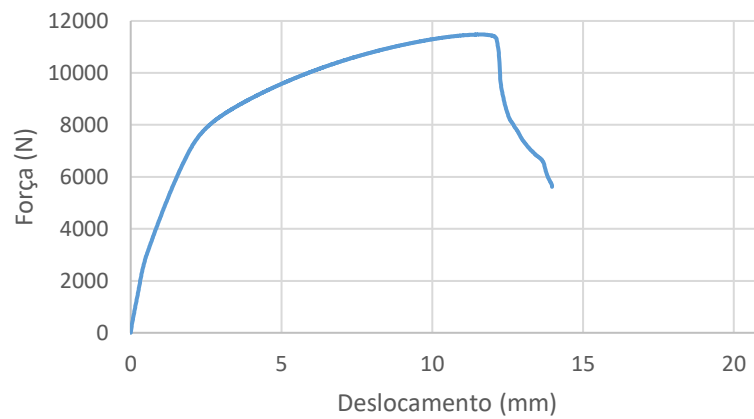
Provete Aço - 6C



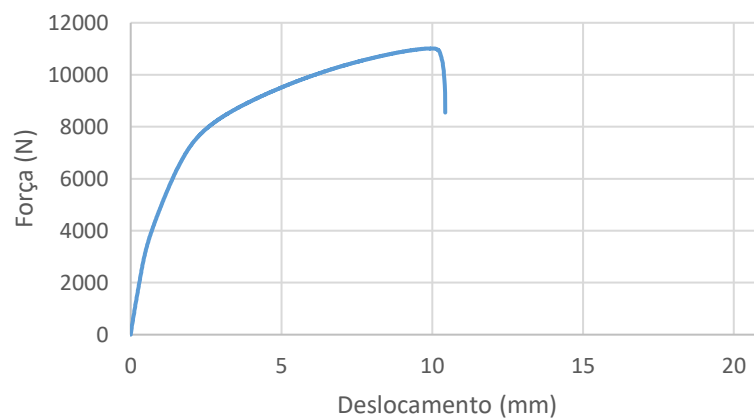
Provete Aço - 7A



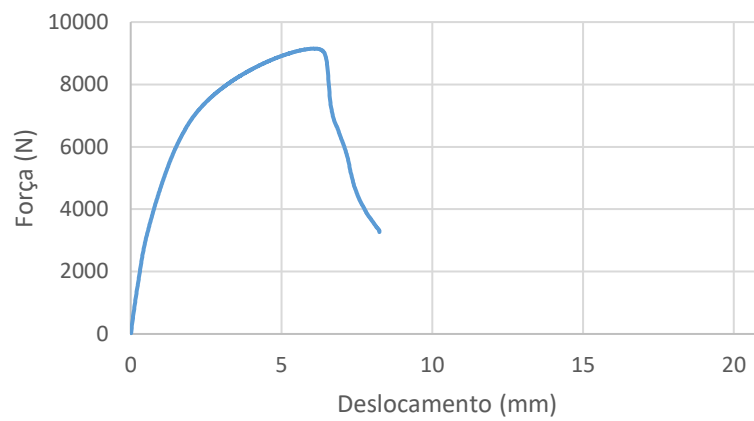
Provete Aço - 7B



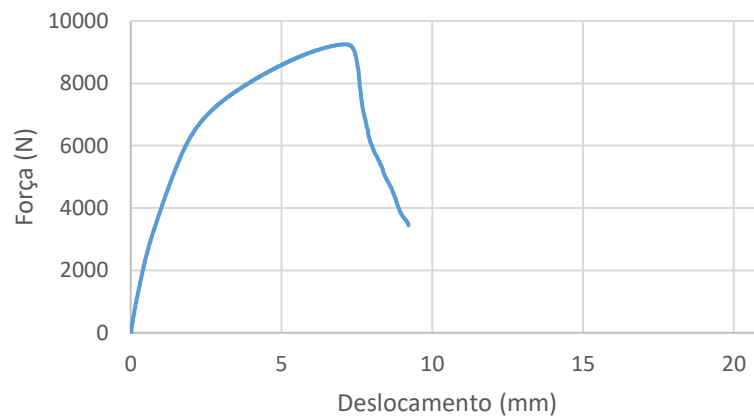
Provete Aço - 7C



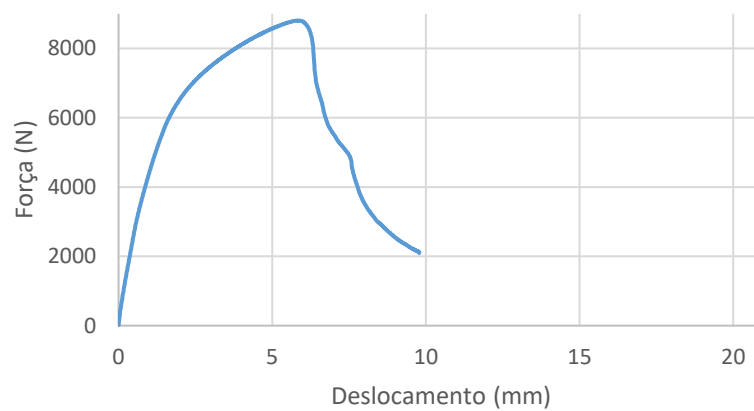
Provete Aço - 8A



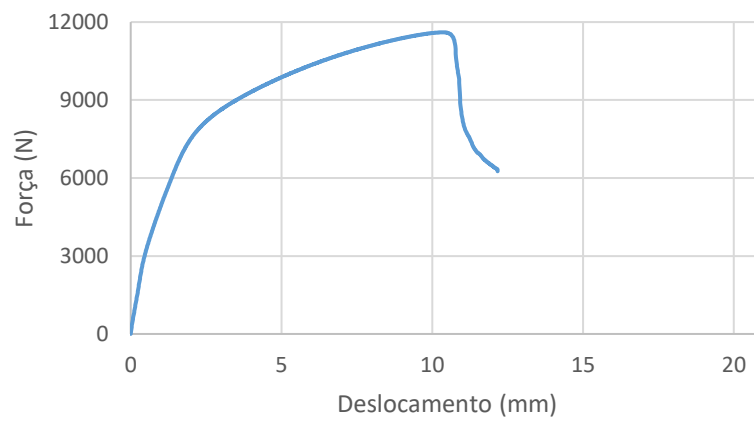
Provete Aço - 8B



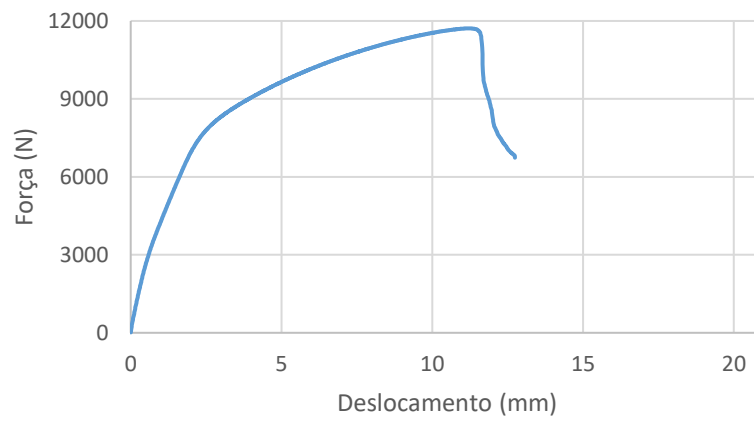
Provete Aço - 8C



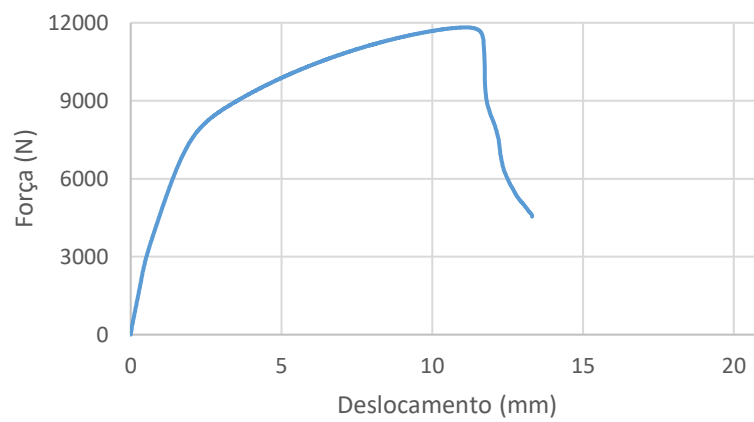
Provete Aço - 9A



Provete Aço - 9B

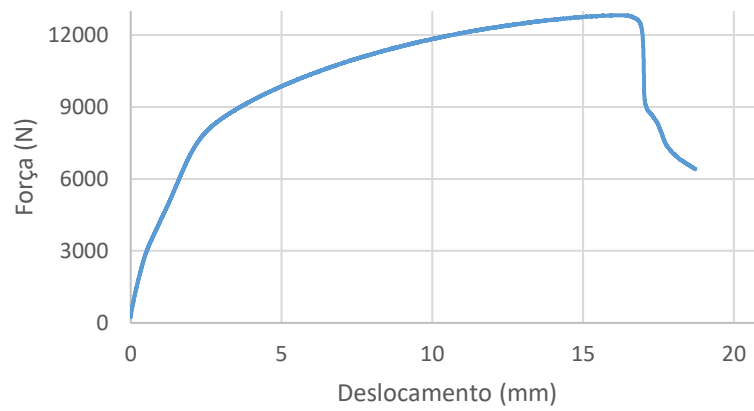


Provete Aço - 9C

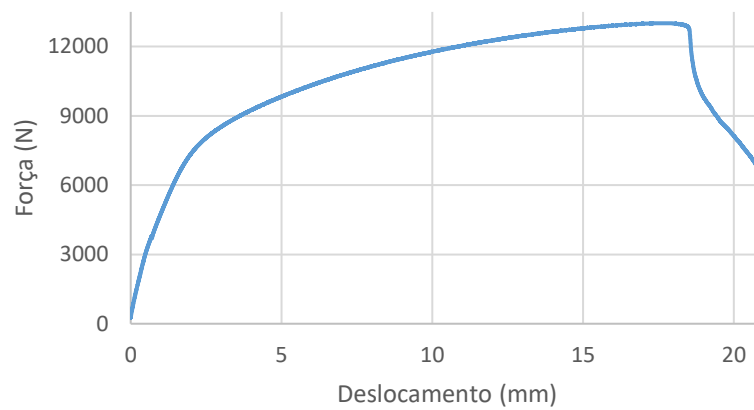


APÊNDICE D

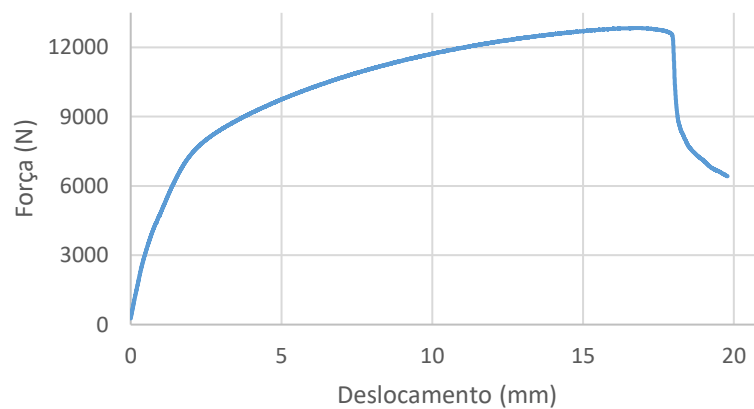
Provete Aço - 10A



Provete Aço - 10B

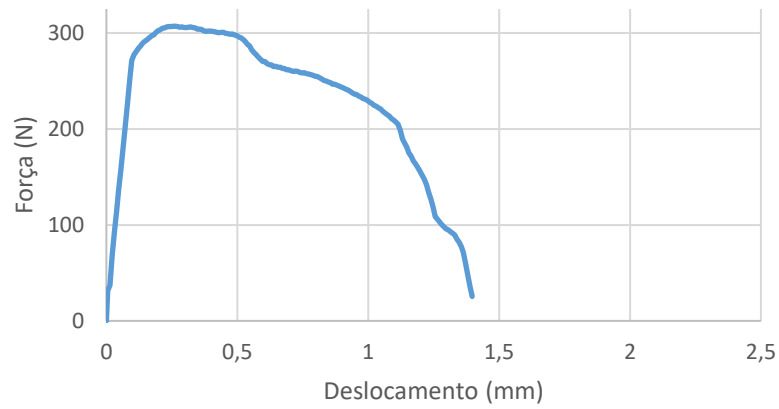


Provete Aço - 10C

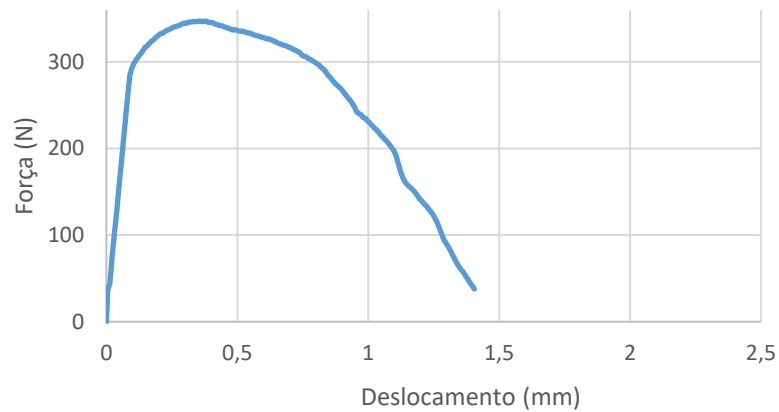


APÊNDICE E

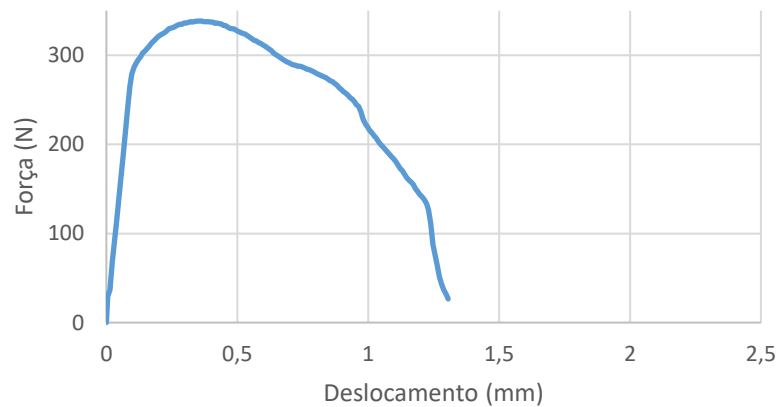
Provete Alumínio - 1A



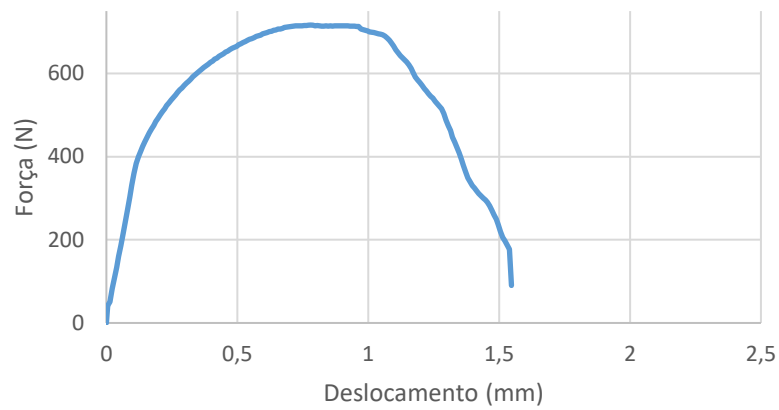
Provete Alumínio - 1B



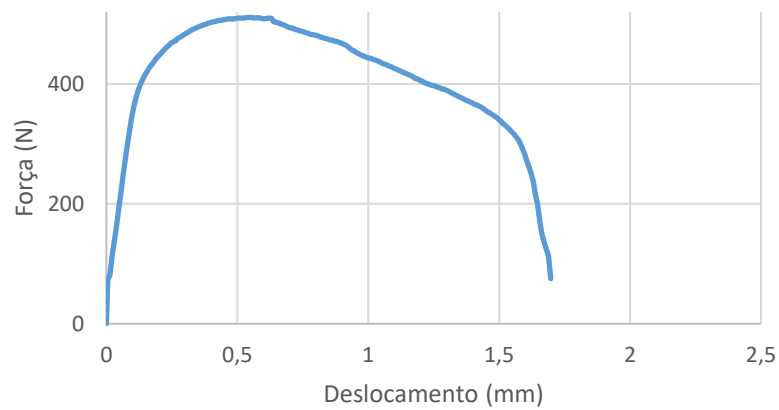
Provete Alumínio - 1C



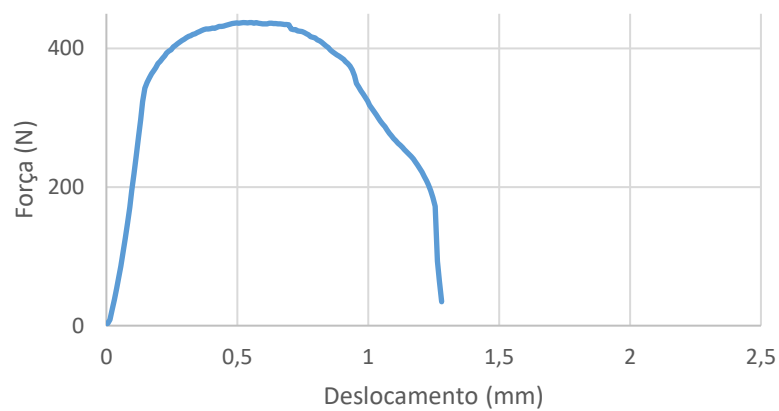
Provete Alumínio - 2A



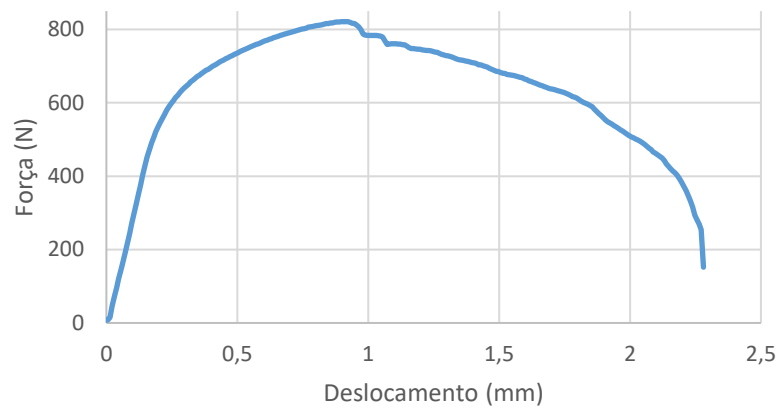
Provete Alumínio - 2B



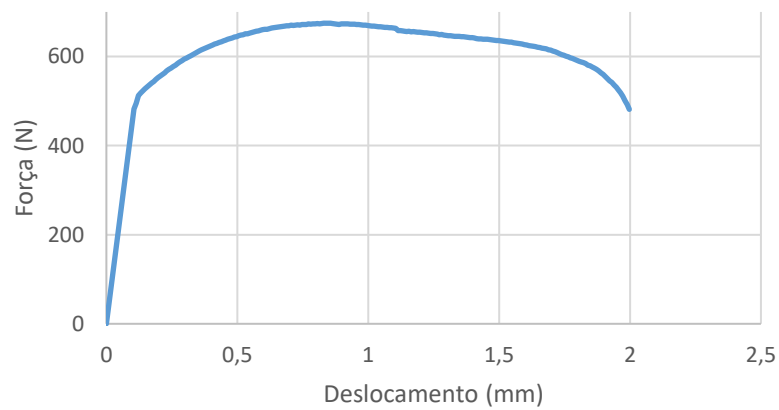
Provete Alumínio - 2C



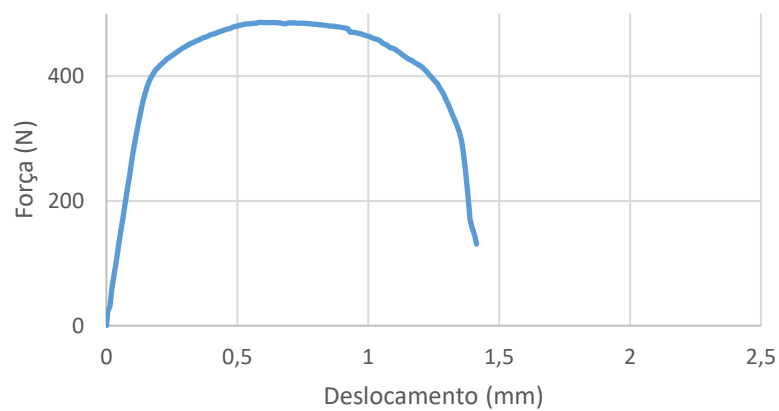
Provete Alumínio - 3A



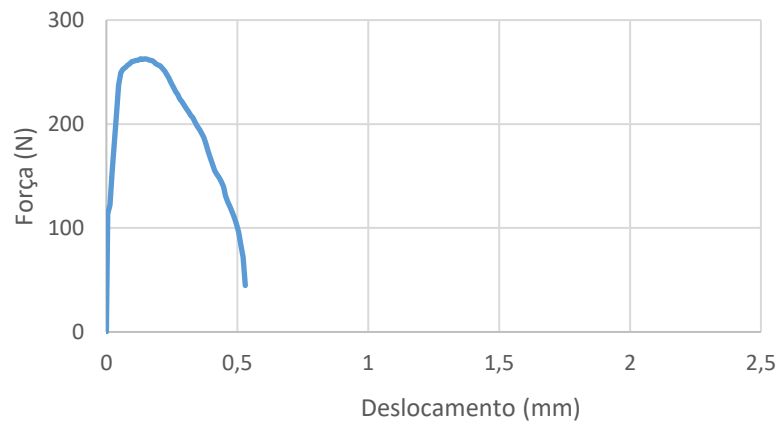
Provete Alumínio - 3B



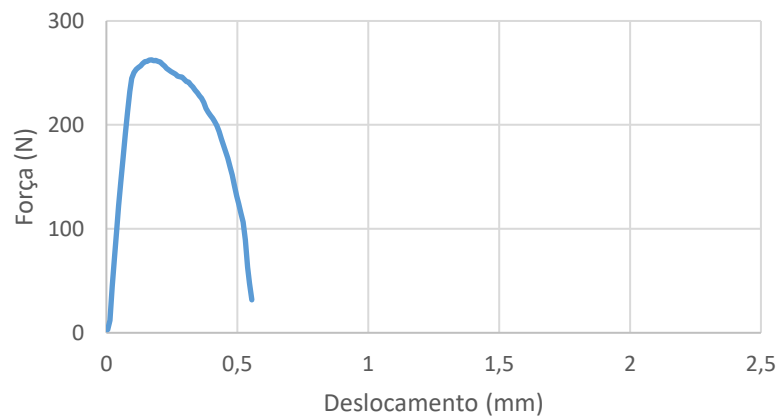
Provete Alumínio - 3C



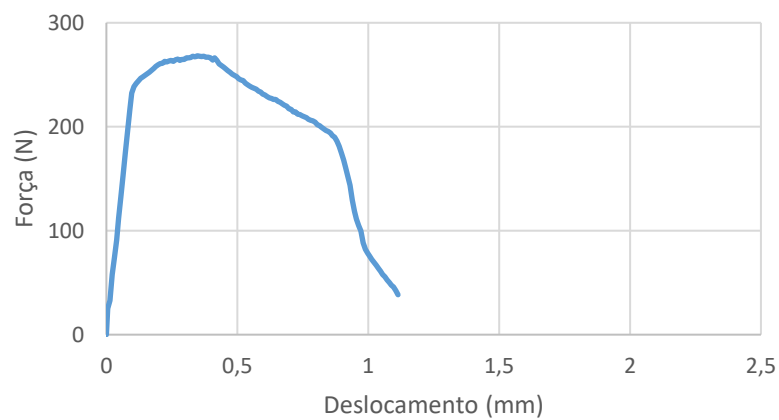
Provete Alumínio - 4A



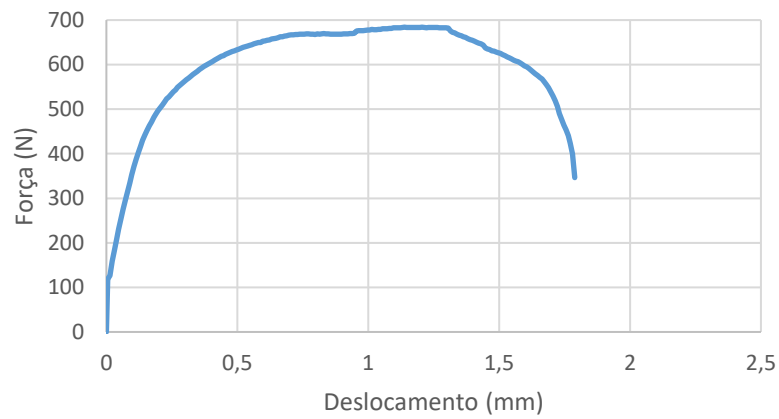
Provete Alumínio - 4B



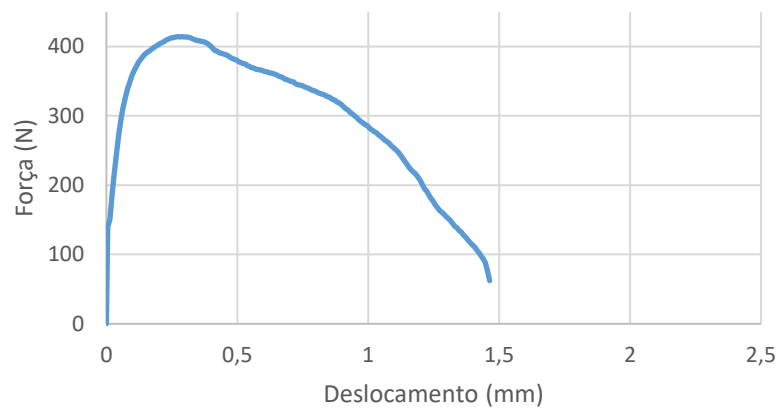
Provete Alumínio - 4C



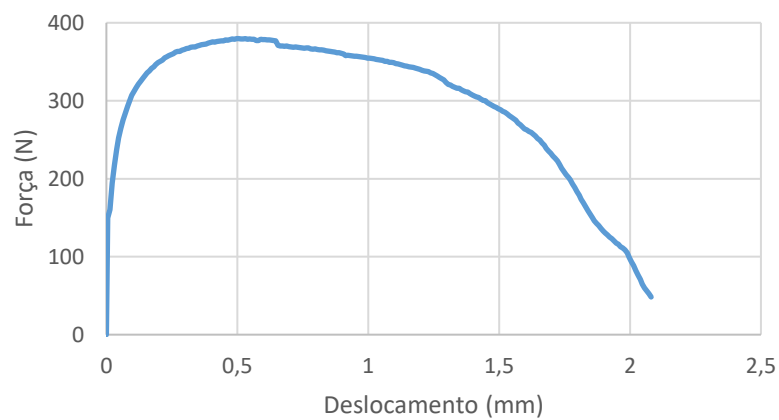
Provete Alumínio - 5A



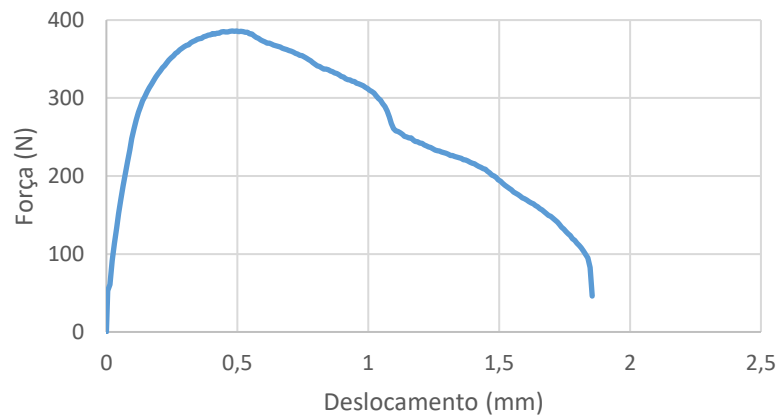
Provete Alumínio - 5B



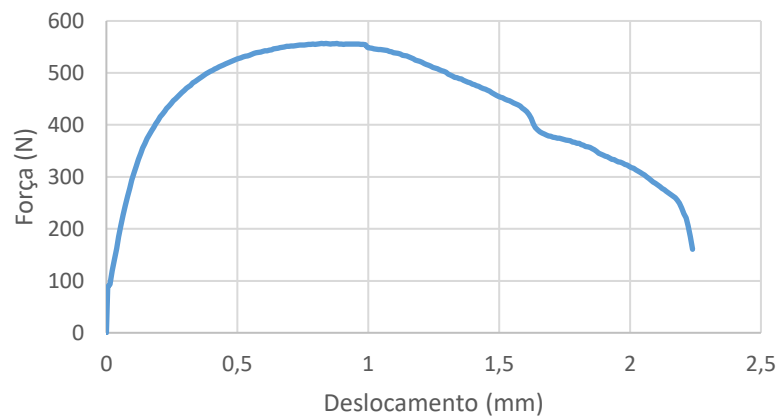
Provete Alumínio - 5C



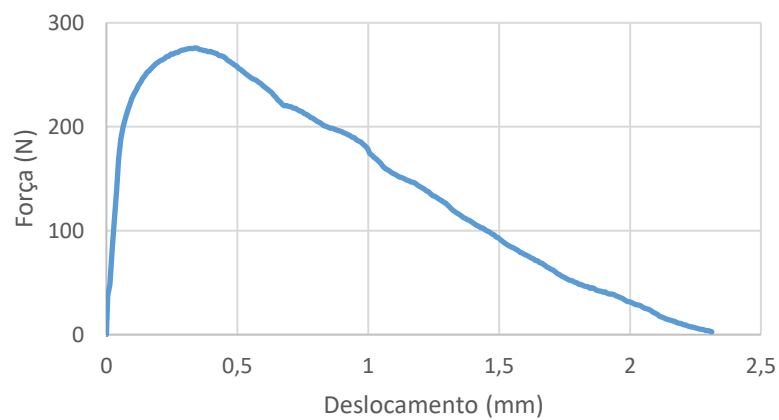
Provete Alumínio - 6A



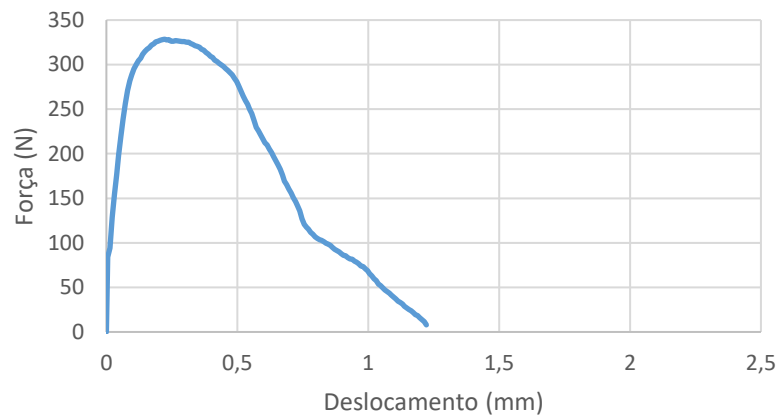
Provete Alumínio - 6B



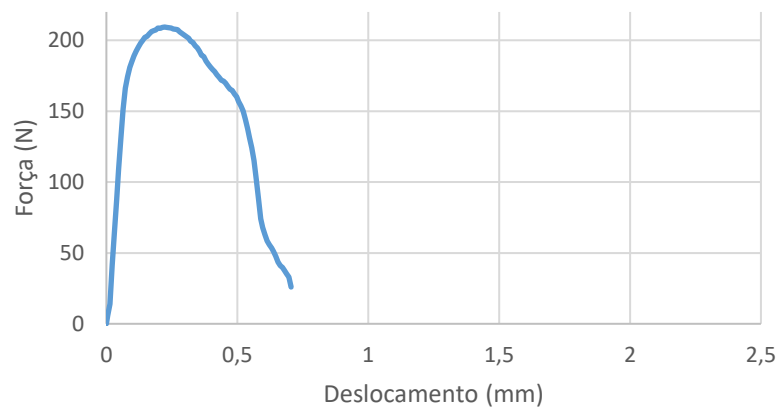
Provete Alumínio - 6C



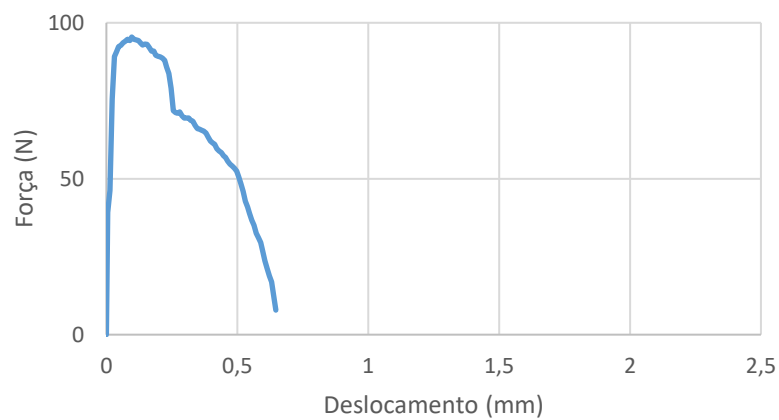
Provete Alumínio - 7A



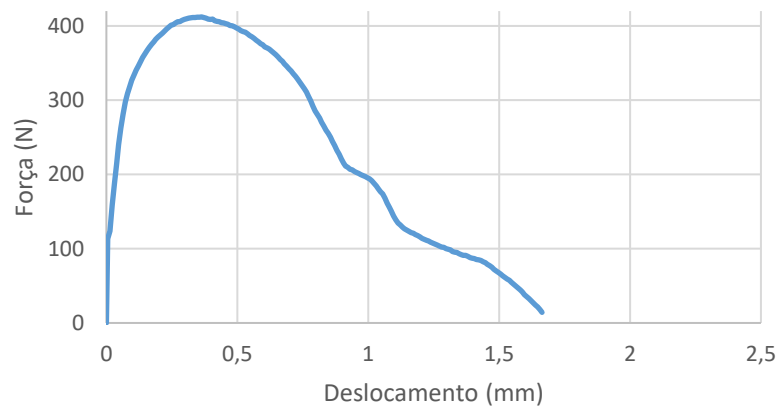
Provete Alumínio - 7B



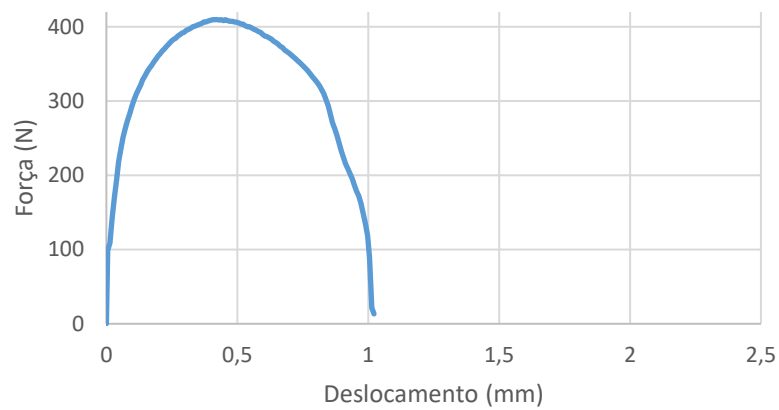
Provete Alumínio - 7C



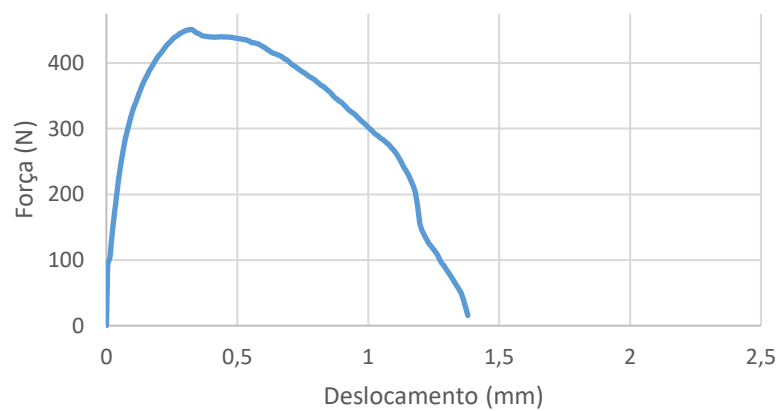
Provete Alumínio - 8A



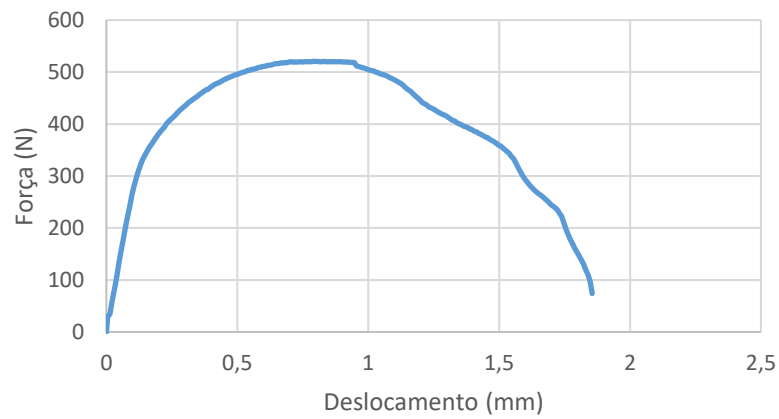
Provete Alumínio - 8B



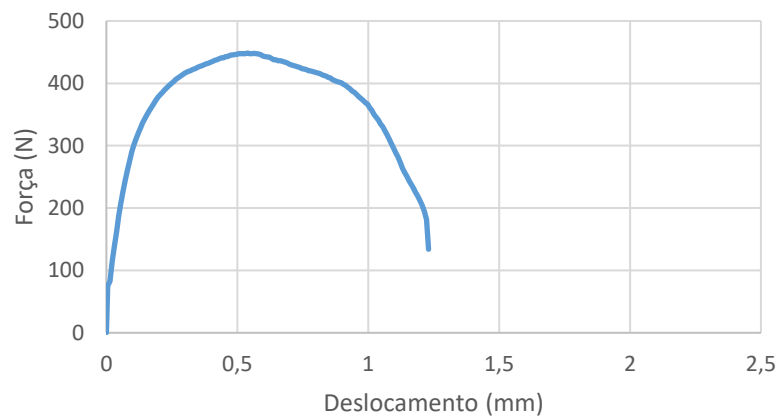
Provete Alumínio - 8C



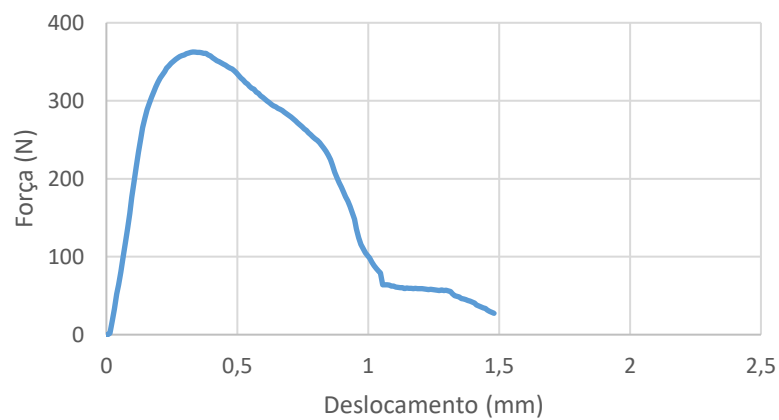
Provete Alumínio - 9A



Provete Alumínio - 9B

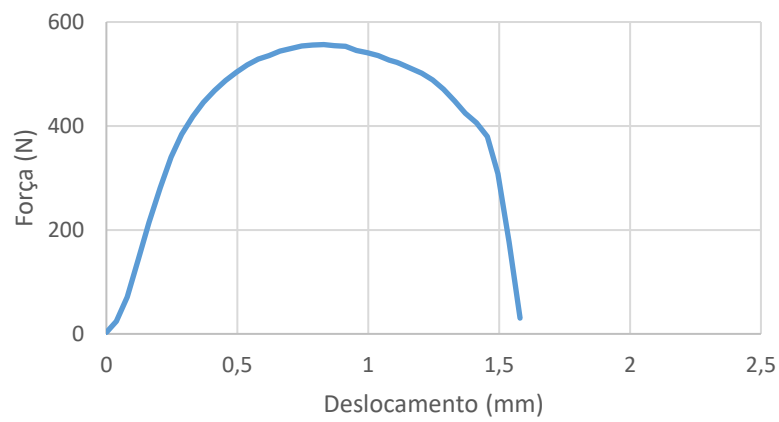


Provete Alumínio - 9C

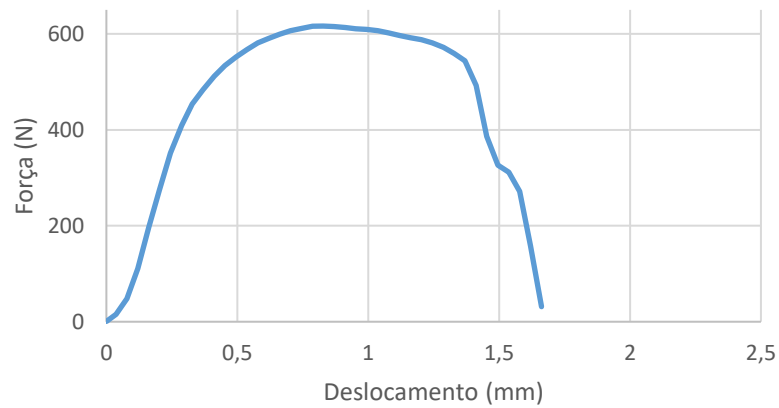


APÊNDICE F

Alumínio - Provete 3D



Alumínio - Provete 3E



ANEXO A

Z - NKL

1. Technical data

			ZT - ZP		NKLT - NKLP		
			18	28	22	28	48
Nominal maximum power	$S_{N\ max.}$	kVA	15	25	20	25	45
Nominal power at 50% duty cycle	S_n	kVA	12	20	16	18	28
Maximum short-circuit power	S_{sc}	kVA	28.9	52	45.6	69.4	82
Maximum welding power	S_{max}	kVA	23	41.6	36.5	54.7	65.6
Mains voltage frequency		Hz	50-60	50-60	50-60	50-60	50-60
Secondary open-circuit voltage	U_{20}	V	2.6	3.5	3.5	4.2	5.1
Maximum short-circuit secondary current	I_{2sc}	kA	10.2	13.8	11.6	14	17.8
Maximum welding secondary current		kA	8.2	11	9.3	11.2	14.2
Secondary thermal current at 100%	$I_{th\ MAX}$	kA	3.25	4.04	3.23	3.03	3.87
Welding capacity on iron and class C steel		mm	3+3	5+5	4+4	5+5	7+7
Electrode throat depth	l	mm	250 600	250 600	455	455	490
Throat gap	e	mm	215	215	173 410	168 443	163 438
Electrode-arm diameter		mm	40	40	40	45	50
Electrode holder diameter		mm	21	21	21	21	25
Electrode diameter		mm	16	16	16	16	16
Electrode taper		%	10	10	10	10	10
Std. distance between electrodes		mm	20	20	20	20	20
Max. distance between electrodes		mm	75	75	45	45	45
Electrode force with min. arms throat depth at 600 kPa (6 bar)	$F_{max.}$	N	2200	2200	-	-	-
Electrode force with MAX arms throat depth at 600 kPa (6 bar)	$F_{min.}$	N	900	900	-	-	-
Max electrode force at 600 kPa (6 bar)	$F_{max.}$	N	-	-	1800	2200	2600
Water consumption	Q	l/min	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Depth		mm	760	760	980	980	1020
Width		mm	330	330	330	390	390
Height		mm	1200	1200	1200	1250	1250
Mass ZT - NKLT	m	kg	104	118	120	167	194
Mass ZP - NKLP	m	kg	102	116	118	165	192

ANEXO B

Welding class A

Thickness s [mm]	d [mm]	D ≥	A min.	L min.	Welding time [periods]	Electrode force [daN]	Welding current [A]	Nugget diameter [mm]
0.25	4	10	6.5	10	3	91	4000	3.3
0.5	5	10	10	11	5	136	6100	4.3
0.75	6	13	13	12	6	181	8000	5.3
1	6.5	13	19	13	9	227	9200	5.8
1.25	6.5	13	22	14	10	295	10300	6.3
1.5	6.5	13	27	16	12	362	11600	6.9
2	8	16	35	17	18	496	13300	7.9
2.5	8	16	41	19	21	590	14700	8.6
3	10	16	50.8	22	25	815	17500	10.2